

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**EVALUACIÓ DE LA RESPOSTA ESTRUCTURAL D'EDIFICIS
AÏLLATS I AGREGATS DE MAÇONERIA NO-REFORÇADA**



Memòria i Annexos

Autor: Arnau Sales Mateo
Director: Jorge Arturo Avila Haro
Convocatòria: Gener 2019

Resum

Al segle XIX la ciutat de Barcelona va decidir expandir-se per poder donar espai a l'augment de població a la ciutat fruit de l'esclat de la Revolució Industrial i de la necessitat de la millora de les condicions de vida dels barcelonins. Així doncs, s'origina el projecte de l'Eixample ideat per Ildefons Cerdà. Les noves construccions es realitzaren a base d'obra de fàbrica o maçoneria no-reforçada i de manera que els edificis quedessin en contacte uns amb els altres formant així un macro-agregat d'edificis que podia arribar a ser de tota l'illa. La falta de coneixement, tècniques constructives i el poc control en l'elaboració dels materials constructius van provocar que aquests edificis no estiguessin preparats davant una possible amenaça sísmica. Molts d'aquests edificis segueixen existint avui en dia i amb l'avanç de les tècniques de càlcul i les noves normatives constructives es poden realitzar càlculs bastant precisos sobre el comportament d'aquests edificis sobre l'actuació d'una càrrega lateral en aquests originada a causa d'un terratrèmol. És important doncs, l'estudi de les possibles conseqüències que pot ocasionar un sisme en aquestes construccions que afectarien a un gran nombre d'habitants de la capital catalana.

La finalitat d'aquest treball doncs, serà calcular com afectaria un terratrèmol en un edifici de maçoneria no-reforçada si aquest perd el recolzament amb els edificis contigus i comparar el comportament amb un model d'agregat de dos edificis, en aquest cas iguals en mida i nivells. Així doncs, s'ha trobat un model existent de l'Eixample de Barcelona per poder basar l'estudi en dades reals. Aquest anàlisi s'ha realitzat aplicant les normatives espanyoles i europees amb el mètode estàtic no lineal N2 per l'anàlisi estàtic i el proposat al projecte RISK-UE per l'anàlisi fràgil.

Els resultats obtinguts mostren uns índexs de dany que poden arribar a sobrepassar valors del 50% mostrant així l'alta vulnerabilitat d'aquest tipus d'edificis. També mostren que, pel cas d'estudi, la influència de tenir o no l'edifici contigu no afecta en els valors d'índex de dany. Malgrat això, el comportament de l'agregat és més fràgil, suportant valors de tallant superiors, però permetent desplaçaments al sostre inferiors respecte l'aïllat. Això últim és d'esperar ja que l'agregat presenta una planta més ampla amb la participació d'un major nombre d'elements els quals aporten aquesta rigidesa.

Resumen

En la segunda mitad del siglo XIX la ciudad de Barcelona decidió expandirse para poder dar espacio al aumento de población en la ciudad fruto del estallido de la Revolución Industrial y de la necesidad de la mejora de las condiciones de vida de los barceloneses. Así pues, se origina el proyecto del “*Eixample*” o Ensanche ideado por Ildefons Cerdà. Una gran cantidad de las nuevas construcciones se realizaron a base de obra de fábrica o mampostería no-reforzada y de manera que los edificios quedasen en contacto unos con otros compartiendo las paredes medianeras y formando así un agregado de edificios que podía llegar a ser de toda la manzana. La falta de consideración de los efectos de fuerzas horizontales, las técnicas constructivas de la época y el poco control en la elaboración de los materiales de construcción son factores que elevan la vulnerabilidad y el riesgo ante fenómenos sísmicos de estas estructuras. La gran mayoría de estos edificios siguen en uso hoy en día, con lo cual su estudio es importante. Actualmente, gracias a las técnicas de cálculo y las nuevas normativas constructivas se pueden realizar estudios bastante precisos.

La finalidad de este trabajo consistirá principalmente en comparar el comportamiento estructural de edificios de mampostería no-reforzada, característicos del distrito del *Eixample*, modelados tanto de manera agregada como de manera aislada simulando con ello un fenómeno cada vez más común hoy en día: el derribo de estructuras para dar paso a nuevas edificaciones. Este análisis se ha realizado aplicando las normativas españolas y europeas con respecto a la definición de la demanda sísmica, el análisis *pushover* para caracterizar la capacidad de los modelos, así como el método estático no lineal N2 para la obtención del desempeño de la estructura. Finalmente, y de acuerdo con lo propuesto en el proyecto RISK-UE, se obtienen las curvas de fragilidad de cada estructura, así como la probabilidad de excedencia de cada uno de los diversos estados de daño previamente definidos.

Los resultados obtenidos muestran unos índices de daño que pueden llegar a sobrepasar valores del 50% mostrando así la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios. También muestran que, para el caso de estudio, la influencia de tener o no el edificio contiguo no afecta en los valores de índice de daño. No obstante, el comportamiento del agregado es más frágil, soportando valores de cortante superiores, pero permitiendo desplazamientos en el techo inferiores, con respecto del edificio aislado. Lo anterior es de esperarse, ya que el agregado presenta una planta más amplia, con la participación de un mayor número de elementos, los cuales aportan dicha rigidez.

Abstract

In the 19th century, the city of Barcelona decided to expand to give space to the increase in the population in the city as a result of the outbreak of the Industrial Revolution and the need to improve the living conditions of the people of Barcelona. Thus, the project of the “*Eixample*” designed by Ildefons Cerdà was originated. The new constructions were made with unreinforced masonry and so the buildings were in contact one with each other, forming a macro-aggregate of buildings that can go through the entire island. The lack of knowledge, constructive techniques and the little control in the elaboration of the constructive materials caused these buildings to not be prepared in case of a possible seismic threat. Many of these buildings continue existing nowadays and with the advance of the calculus techniques and the new construction regulations, quite accurate calculations can be carried out to identify the behaviour of these buildings against the threat of a lateral load originated due an earthquake. It is important then, to study the possible consequences that an earthquake could cause in these buildings which would affect a large number of inhabitants of the Catalan capital.

The purpose of this work then will be to calculate how an earthquake would impact an unreinforced masonry building if it loses the support of a contiguous building and to compare the resultant behaviour with an aggregate model of two buildings, in this case equal in size and levels. Therefore, an existing model of the *Eixample* of Barcelona has been obtained to be able to base the study on real data. This analysis has been carried out applying the Spanish and European regulations with the N2 non-linear static method for static analysis and the one proposed in the RISK-UE project for fragile analysis.

The results obtained show damage rates that can exceed 50%, showing the high vulnerability of this type of buildings. These results also show that, for the case of study, the influence of having the adjacent building or not does not affect the damage index values. However, the behaviour of the aggregate is more fragile, supporting higher shear values, but allowing lower roof displacements, with respect to the isolated building. The foregoing is to be expected, since the aggregate presents a larger plant, with the participation of a greater number of elements that contribute to the stiffness.

Agraïments

Gràcies als meus pares pel suport i recolzament durant els anys de carrera. Gràcies a tots els amics i família amb qui he compartit hores durant la realització d'aquest treball. Per últim també agrair al professor i director d'aquest projecte Jorge Arturo Avila Haro per l'ajuda en la realització d'aquest treball i pel subministrament de gran quantitat de documentació, a part dels models de treball i codis aplicats per la resolució de les qüestions aplicades en aquest document.

Glossari

Símbol	Unitats	Descripció
Sd	cm	Desplaçament espectral
ϕ	-	funció normal logarítmica estàndard acumulada
β	-	desviació estàndard
Dm	-	Estat mitjà de dany
Pk	-	Probabilitat de succeïment de cada estat de dany
ab	g	Acceleració bàsica
vs	m/s	velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de cisalla del terratrèmol
C	-	Coefficient de terreny
PGA	g	Peak ground acceleration
ρ	-	Coefficient adimensional de risc
S	-	Coefficient d'ampliació del terreny
Sa(T)	g	valor de l'espectre normalitzat de resposta elàstica
T	s	període propi de l'oscil·lador en segons
K	-	Coefficient de contribució
Ta, Tb	s	períodes característics de l'espectre de resposta
Dy	cm	Desplaçament de fluència
Ay	g	Acceleració de fluència
Du	cm	Desplaçament últim
Au	g	Acceleració última

Símbol	Unitats	Descripció
E	MPa	mòdul de Young
G	MPa	mòdul de cisalla
τ_0	MPa	tensió a cisalla
f_m	MPa	resistència a la compressió
V_{base}	N	l'esforç tallant aplicat a la base
droof	cm	açament obtingut a la part superior del model
m_x	kg	Massa desplaçada en la direcció X
M_x	%	Massa desplaçada en la direcció X en tant per cent
m_y	kg	Massa desplaçada en la direcció Y
M_y	%	Massa desplaçada en la direcció Y en tant per cent

Abreviació	Descripció
NCSE-02	Norma de construcció Sismoresistent
NSP	Procediments estàtics no lineals
CSM	mètode l'espectre de capacitat
AD	acceleració-desplaçament
PP	punt de funcionament o <i>performance point</i>
MSK	escala Medvédev-Sponheuer-Kárník d'intensitat macrosísmica
E01	Model estructural de l'edifici individual
AG01	Model estructural de l'agregat d'edificis (E01+E01)
3Muri	Tremuri

Abreviació	Descripció
MDOF	múltiples graus de llibertat
SDOF	un sol grau de llibertat
DS	Estat de dany
DI	Índex de dany





Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
GLOSSARI	V
ÍNDEX	X
TAULA DE FIGURES	XII
1. INTRODUCCIÓ	19
1.1. Objectius del treball.....	19
1.2. Abast del treball.....	20
2. INTRODUCCIÓ HISTÒRICA	21
2.1. Barcelona	21
2.2. Pla Cerdà	24
2.2.1. Ildefons Cerdà	24
2.2.2. Pla Cerdà	25
2.3. L'Eixample	29
3. METODOLOGIA	31
3.1. Mètodes estàtics no lineals (NSP)	31
3.1.1. El mètode de l'espectre de capacitat CSM, ATC-40	31
3.1.2. El mètode N2.....	32
3.2. Fragilitat, projecte Risk-UE	32
3.3. Espectre de demanda	34
3.3.1. Mapa de perillositat sísmica	35
3.3.2. Escenari sísmic	36
3.4. Procediment	38
3.4.1. Corbes de capacitat i de fragilitat	39
4. EDIFICIS	42
4.1. Edifici model.....	45
5. CÀLCULS I RESULTATS	48

5.1.	Anàlisi modal	48
5.2.	Anàlisi <i>pushover</i>	49
5.2.1.	Corbes de capacitat	49
5.3.	Corbes de fragilitat.....	50
5.4.	Probabilitat estats de dany	51
5.5.	Índex de dany	52
5.6.	Comparativa model individual i agregat.....	52
5.6.1.	Corbes de capacitat	53
5.6.2.	Corbes de capacitat de les parets d'interès	53
5.6.3.	Comparativa Pushover i parets d'interès.....	54
6.	DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS	56
7.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	59
8.	PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	60
	BIBLIOGRAFIA	61
	ANNEX A	64
A.1.	Model individual, E01	64
	Corbes de capacitat.....	64
	Corbes de fragilitat.....	72
	Probabilitat estats de dany	74
	Índex de dany per cada desplaçament espectral	76
A.2.	Model agregat, AG01	78
	Corbes de capacitat.....	78
	Corbes de fragilitat.....	86
	Probabilitat estats de dany	88
	Índex de dany per desplaçament espectral	90

Taula de figures

Figura 1. Plànol dels voltants de Barcelona i projecte de la seva reforma i eixample (6)	21
Figura 2. Carrer Marlet, Barcelona. Exemple de carrer de la Ciutat Vella (7)	22
Figura 3. “Abajo las murallas!!!”, obra de Pere Felip Monlau i Roca amb la que va resultar guanyador del concurs sobre els avantatges de l'enderrocament de la muralla medieval i moderna de Barcelona el 1841 (9)	23
Figura 4. Retrat d'Ildefons Cerdà (11)	24
Figura 5. “Plano de los alrededores de la Ciudad de Barcelona. Proyecto de su reforma y ensanche” (6).	25
Figura 6. Exemple de com pretenia ser el pla Cerdà en un inici (14).	26
Figura 7. Mostra de la disposició de les vies no ordinàries del Pla Cerdà (15)	28
Figura 8. Evolució de la densificació constructiva des del Pla Cerdà fins ara (10).	29
Figura 9. Vista aèria de l'Eixample (18)	30
Figura 10. Corba de fragilitat i histograma amb les probabilitats de cada estat de dany. Ambdues figures pertanyen al model individual avaluat i a la direcció Y positiva. La línia discontinua senyala el desplaçament espectral pel PP trobat.	34
Figura 11. Mapa sísmic de la norma NCSE-02 (26).	35
Figura 12. Exemple d'espectre de resposta elàstica (26).	37
Figura 13. Modes de vibració en models plans d'estructures de pisos (26).	38
Figura 14. Il·lustració de terres típics. es mostra un esbós de plànol antic (superior) i esquemes basats en esbossos originals de bigues de fusta (esquerra) i metàl·liques (dreta). En els 3 casos es mostres les voltes de ceràmica (17).	43

Figura 15. Illa d'edificis típica de l'Eixample (30)	43
Figura 16. Exemple de part frontal edifici de l'Eixample. Es pot veure com la primera planta disposa d'una altura més elevada que les següents (17).	44
Figura 17. Detalls del nervi de dos edificis de l'Eixample (31).	44
Figura 18. Model 3D de l'edifici agregat. S'hi poden veure senyalades les direccions que defineixen l'aplicació de la demanda, X i Y.	45
Figura 19. Models CAD de l'edifici individual. S'observa la planta tipus a l'esquerra i la planta baixa a la dreta.	46
Figura 20. Vista en planta del pis tipus a l'esquerra i de la planta baixa a la dreta del programa Tremuri.	47
Figura 21. Corbes de capacitat en sistemes MDOF (esquerra) i SDOF (dreta) pel model individual en la direcció X positiva.	49
Figura 22. Espectre de capacitat enfront de la demanda per l'edifici individual en la direcció X positiva.	50
Figura 23. Corbes de fragilitat pel model agregat en les direccions X positiva (esquerra) i Y positiva (dreta).	51
Figura 24. Probabilitat de cada estat de dany per model individual direccions Y (esquerra) i X (dreta) positives.	51
Figura 25. Índex de dany en funció del desplaçament espectral pel model agregat en les direccions Y (esquerra) i X (dreta) positives. Marcats en línies discontinües es mostren els valors de DI pels pga 0,04 i 0,194.	52
Figura 26. Corbes de capacitat pels models individual (línies contínues) i agregat (línies discontinües) per la direcció X positiva.	53
Figura 27. Corbes de capacitat de les capacitats d'interès. Es mostren les direccions X positiva (superior) i Y positiva (inferior).	54

- Figura 28. Corba pushover total i contribucions de les parets perimetrals per l'eix X (superior) i Y (inferior). _____ 55
- Figura 29. Corba de capacitat sistema MDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01. _____ 64
- Figura 30. Corba de capacitat sistema SDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01. _____ 64
- Figura 31. Espectre de capacitat sistema SDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01. _____ 65
- Figura 32. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel sentit X negatiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 65
- Figura 33. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X positiu pel model individual, E01. _____ 66
- Figura 34. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model individual, E01. _____ 66
- Figura 35. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model individual, E01. _____ 67
- Figura 36. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit X positiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 67
- Figura 37. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01. _____ 68
- Figura 38. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01. _____ 68
- Figura 39. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01. _____ 69
- Figura 40. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit Y negatiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 69
- Figura 41. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01. _____ 70

- Figura 42. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01. _____ 70
- Figura 43. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01. ____ 71
- Figura 44. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit Y positiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 71
- Figura 45. Corba de fragilitat pel model individual direcció X sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 72
- Figura 46. Corba de fragilitat pel model individual direcció X sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 72
- Figura 47. Corba de fragilitat pel model individual direcció Y sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 73
- Figura 48. Corba de fragilitat pel model individual direcció Y sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 73
- Figura 49. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció X negativa. _____ 74
- Figura 50. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció X positiva. _____ 74
- Figura 51. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció Y negativa. _____ 75
- Figura 52. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció Y positiva. _____ 75
- Figura 53. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció X negativa. _____ 76

- Figura 54. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció X positiva. _____ 76
- Figura 55. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció Y negativa. _____ 77
- Figura 56. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció Y positiva. _____ 77
- Figura 57. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01. ____ 78
- Figura 58. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01. ____ 78
- Figura 59. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01. ____ 79
- Figura 60. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit X negatiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 79
- Figura 61. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01. ____ 80
- Figura 62. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01. ____ 80
- Figura 63. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01. ____ 81
- Figura 64. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit X positiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 81
- Figura 65. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01. ____ 82
- Figura 66. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01. ____ 82
- Figura 67. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01. ____ 83

- Figura 68. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit Y negatiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 83
- Figura 69. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01. _____ 84
- Figura 70. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01. _____ 84
- Figura 71. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01. _____ 85
- Figura 72. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit Y positiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu. _____ 85
- Figura 73. Corba de fragilitat pel model agregat direcció X sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 86
- Figura 74. Corba de fragilitat pel model agregat direcció X sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 86
- Figura 75. Corba de fragilitat pel model agregat direcció Y sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 87
- Figura 76. Corba de fragilitat pel model agregat direcció Y sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$. _____ 87
- Figura 77. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció X negativa. _____ 88
- Figura 78. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció X positiva. _____ 88
- Figura 79. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció Y negativa. _____ 89
- Figura 80. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció Y positiva. _____ 89

Figura 81. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $\text{pga}=0,04$ i $\text{pga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció X negativa. _____ 90

Figura 82. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $\text{pga}=0,04$ i $\text{pga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció X positiva. _____ 90

Figura 83. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $\text{pga}=0,04$ i $\text{pga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció Y negativa. _____ 91

Figura 84. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $\text{pga}=0,04$ i $\text{pga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció Y positiva. _____ 91

1. Introducció

L'esclat de la revolució industrial al segle XIX va comportar un gran flux de població cap als grans nuclis urbans i un augment de la densitat de població descontrolat en aquests fet que va provocar la necessitat de noves edificacions per albergar als nouvinguts a les grans ciutats. En aquella època, la consideració de les forces horitzontals, és a dir, l'efecte del sisme, no era considerat en el disseny i construcció dels edificis pel que l'estudi de la seva vulnerabilitat davant una demanda sísmica plausible és necessari. Avui en dia amb l'evolució dels diferents codis i normatives sísmiques, es dissenyen i construeixen edificis que consideren l'efecte dels fenòmens esmentats amb l'objectiu d'evitar o reduir el màxim possible desastres futurs en aquest aspecte. Aquests codis es milloren conforme s'afegeixen nous estudis i evidències en el camp de l'enginyeria sísmica i estructural com poden ser (1) o (2). En aquest estudi es pretén analitzar i comparar el rendiment i la fragilitat sísmica d'edificis de maçoneria no-reforçada amb diferents configuracions. Això s'assoleix aplicant el mètode simplificat estàtic no lineal N2 i el que s'estableix en el document RISK-UE (3). Aquest mètode utilitza les corbes de fragilitat que mostren el desplaçament produït al sostre de l'estructura i el tallant a la base al aplicar un patró de càrrega monòton creixent a l'edifici i que, en format d'acceleració espectral, es creuen amb l'espectre de demanda definit segons el territori en que es trobi la construcció per trobar el punt de treball o *performance point*, que defineix el desplaçament espectral que es produiria a l'edifici en l'escenari proposat. Aquest desplaçament espectral s'introdueix a les corbes de fragilitat per obtenir la probabilitat de succeïment de cada estat de dany prèviament definit.

En quant a la ciutat de Barcelona, situada en una zona de risc sísmic baix-moderat (4), també va patir un augment de població dràstic durant el segle XIX i, com en moltes ciutats europees, les noves construccions de l'època es van realitzar en gran part amb obra de fàbrica o maçoneria sense reforçar. Així doncs, la capital catalana disposa d'una gran quantitat d'edificis centenaris construïts amb tècniques poc preparades en cas d'un terratrèmol.

1.1. Objectius del treball

El present treball té com a objectiu l'avaluació de la vulnerabilitat sísmica d'un edifici típic de maçoneria no reforçada del districte barceloní de l'Eixample modelant-lo tant de manera aïllada com a part d'un agregat de dos edificis d'iguals dimensions. Es tracta d'un cas existent pel que aquest estudi permetrà veure un exemple real de transmissió pura de demanda entre dos edificis que disposen del mateix nombre de nivells i amb les mateixes alçades.

L'interès d'aquest estudi ve del fet que en el moment de construcció dels edificis estudiats i de molts dels edificis de l'Eixample, les tècniques constructives acostumaven a unir les parets mitjaneres dels

edificis formant així un macro-agregat que podia ser inclús per tota l'illa d'edificis. Actualment però, amb les noves pràctiques de rehabilitació i construcció alguns s'enderroquen o es reconstrueixen deixant només la façana de l'edifici pel que aquesta continuïtat constructiva es perd. Aquest treball doncs, pretén comprovar les repercussions en la resposta estructural dels edificis seleccionats.

1.2. Abast del treball

En el capítol 2, el document realitzarà una introducció històrica sobre la ciutat de Barcelona i la construcció i evolució de l'Eixample a través del pla ideat per l'enginyer Ildefons Cerdà.

En el capítol 3, s'explica l'estat de l'art, on s'introduiran els mètodes estàtics no lineals començant pel mètode de l'espectre de capacitat ATC-40 del qual deriva el mètode N2, l'aplicat com a procediment de càlcul en aquest treball. També s'introduirà el mètode de càlcul de la fragilitat que es l'establert al projecte RISK-UE. Finalment, en aquest punt s'explicarà la definició de la demanda aplicada a l'edifici que segueix la Normativa de Construcciones Sismorresistentes, NCSE-02 del Ministeri de Foment Espanyol. També s'hi explica en profunditat la metodologia de càlcul aplicada pel càlcul de la vulnerabilitat dels edificis seleccionats. Així doncs, es comenta el procediment pel càlcul de les corbes de capacitat i fragilitat que consisteix en: primerament la definició del model pel programa Tremuri; seguidament l'anàlisi modal; a continuació s'aplica l'anàlisi estàtic no lineal o pushover i com a últim pas l'anàlisi de la fragilitat. També s'exposa com s'ha triat la demanda a aplicar segons normativa per la zona de l'Eixample.

En el capítol 4, s'exhibeixen les propietats dels edificis de maçoneria no reforçada típics de l'Eixample i les dades que defineixen els models obtinguts.

En el capítol 5, s'exposen els resultats obtinguts amb la metodologia aplicada. També es mostraran algunes de les gràfiques i dades obtingudes com a ajut explicatiu i, addicionalment, l'annex A conté tots els resultats obtinguts. En aquest apartat es mostren tant els resultats pels models individuals com agregats i una comparativa d'ambdues opcions.

En el capítol 6 es discutirà i comentarà els resultats obtinguts de manera més extensa i s'exposaran les conclusions obtingudes a partir d'aquests.

En els capítols 7 i 8 es mostra l'impacte ambiental i el pressupost associats al desenvolupament del treball.

2. Introducció Històrica

En aquest apartat primerament es realitzarà una contextualització històrica de la Barcelona de l'època en que es decidí dur a terme el projecte de l'Eixample, en segon lloc s'introduirà l'edifici de Cerdà i el seu pla urbanístic i per últim s'estudiarà el barri de l'Eixample de Barcelona i la seva evolució en el temps.

2.1. Barcelona

A mitjans del segle XVIII es considera que esclata la revolució industrial a Barcelona, fet que va provocar la necessitat de molta mà d'obra que va esdevenir en l'arribada de molts treballadors a la ciutat. El 1818 Barcelona rondava els 83.000 habitants i pel 1850 les xifres eren properes als 187.000 (5).

En aquells moments, la ciutat es trobava envoltada d'una muralla defensiva, com es pot veure a la figura 1, ja que Barcelona era considerada com a ciutat estratègica des del punt de vista militar. Aquest fort creixement de població doncs, va propiciar la creació de nous barris als afores de la muralla com el Raval, Sants, Clot o Gràcia, ja que no hi havia prou espai dins la ciutat històrica per a aplegar tots els nous habitants.

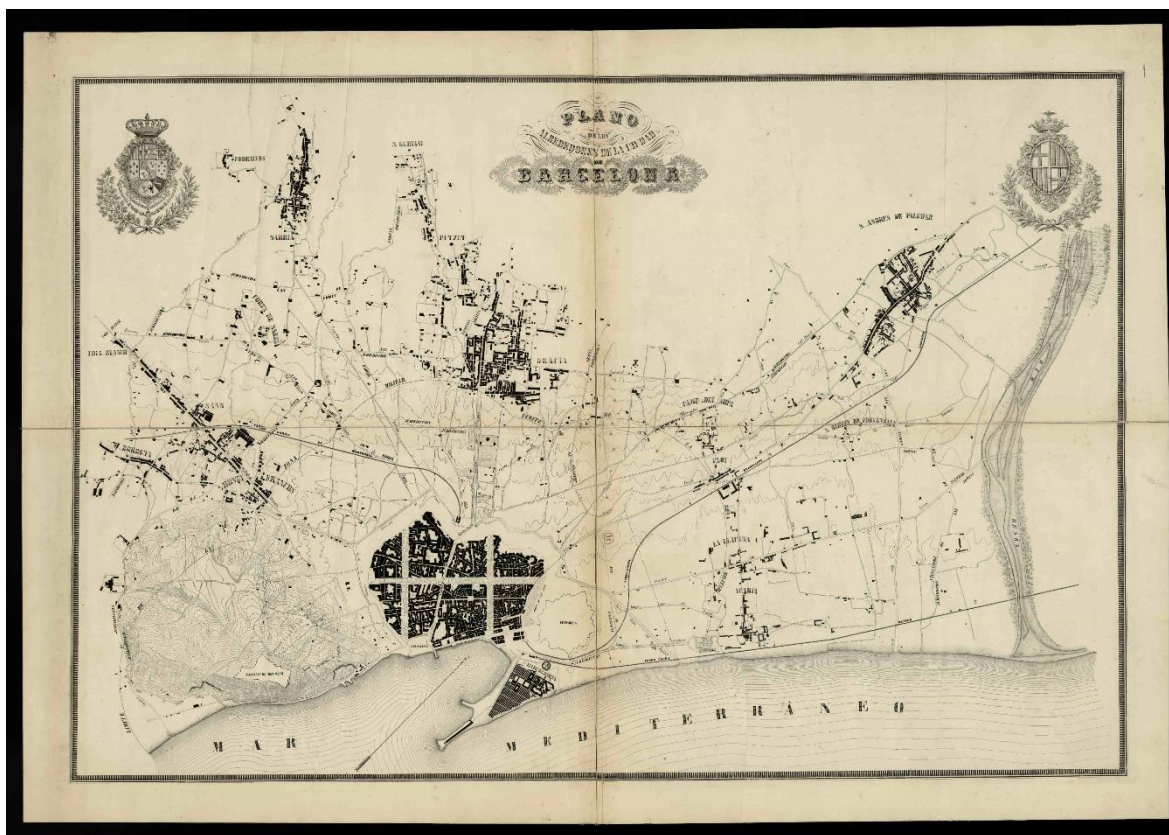


Figura 1. Plànol dels voltants de Barcelona i projecte de la seva reforma i eixample (6)

Aquesta elevadíssima densitat de població, de les més altes d'Europa, i la falta d'higiene als carrers de la ciutat, que constaven d'una amplitud d'uns 4 metres de mitjana, va desenvolupar en una elevada taxa de mortalitat i un ambient irrespirable dins de la muralla. Un exemple de carrer amb l'escassa amplitud es pot veure a la figura 2.



Figura 2. Carrer Marlet, Barcelona. Exemple de carrer de la Ciutat Vella (7)

Aquestes paupèrrimes condicions de vida dels barcelonins van comportar una alta inestabilitat política i un seguit de revoltes populars durant el segle XIX. A més a més, la mortalitat es va veure accentuada per l'epidèmia de còlera del 1854 (8). Així doncs, la vida a la ciutat s'havia fet insostenible i el poble reclamava l'enderrocament de les muralles i l'aprofitament dels terrenys que les vorejaven que en aquells temps estaven formats bàsicament de jardins i horts que servien com a estratègia militar per defensar la ciutat. Un gran impulsor del moviment "*Abajo las murallas*" fou Pere Felip Monlau que va redactar un manifest, mostrat a la figura 3, explicant els motius per els quals la ciutat s'havia d'expandir muralles enllà.

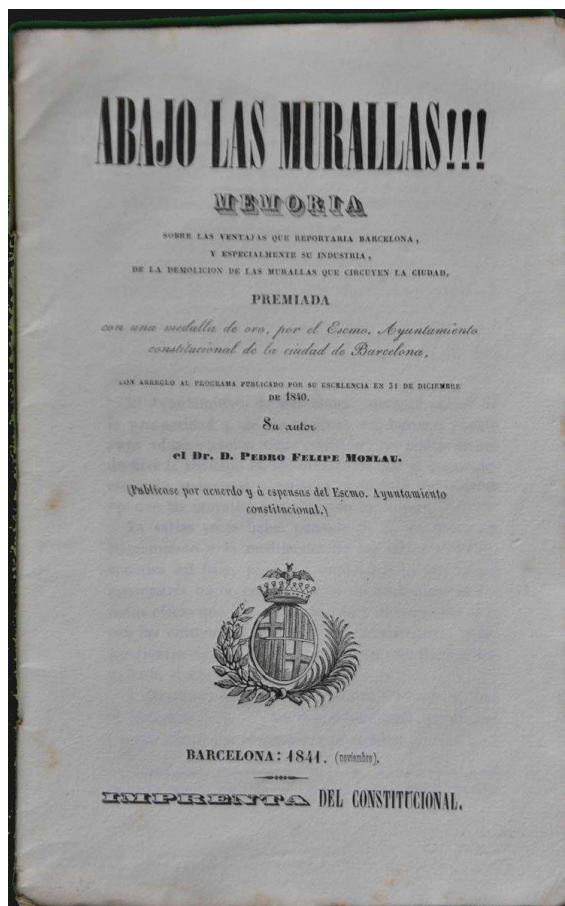


Figura 3. “Abajo las murallas!!!”, obra de Pere Felip Monlau i Roca amb la que va resultar guanyador del concurs sobre els avantatges de l'enderrocament de la muralla medieval i moderna de Barcelona el 1841 (9)

Finalment el 1854, coincidint amb la gran epidèmia de còlera a la capital catalana, el govern central va acceptar l'enderrocament de les muralles i va donar llum verda a l'eixample de la ciutat de Barcelona.

El 1858 considerant que la defensa de la ciutat ja no tenia la importància d'abans, el Ministeri de Guerra va atorgar les competències de la ciutat al Ministeri de Foment, fet que l'Ajuntament va interpretar com a llibertat per construir l'Eixample.

Així doncs, el 1859 per a triar el millor projecte per a eixamplar la ciutat, l'Ajuntament va decidir organitzar un concurs públic on s'hi van presentar 14 projectes i del qual Antoni Rovira i Trias en va resultar guanyador. Tot i això, a causa de que es pretenia ocupar una zona 10 vegades més gran que la ciutat històrica i que afectava a 7 municipis independents, el Ministeri de Foment va decidir encomanar el projecte a Ildefons Cerdà, un enginyer de camins català que ja havia realitzat estudis sobre la ciutat de Barcelona i els seus habitants, i ho va fer mitjançant un Reial Decret el 31 de maig de 1860 (10).

Avui en dia, dels diferents estudis comparatius dels diversos projectes presentats es pot extreure que la imposició del govern central va resultar més progressista i adequada a les necessitats de la ciutat.

2.2. Pla Cerdà

2.2.1. Ildefons Cerdà

Ildefons Cerdà i Sunyer, vist a la figura 4, fou el creador del pla Cerdà, el pla urbanístic que pretenia organitzar la capital catalana. Va cursar estudis d'enginyeria de camins, canals i ports a Madrid i els inicis de la seva vida professional els va passar treballant per l'Estat en varies ciutats entre les quals es trobava Barcelona. Algunes de les seves obres importants sobre Barcelona van ser el pla topogràfic d'aquesta i un estudi de les condicions de vida dels habitants on va poder comprovar que eren precàries. Aquest últim estudi va ser la que el va portar a la realització del projecte d'eixample de Barcelona amb una disposició molt més higienista que la contemporània.



Figura 4. Retrat d'Ildefons Cerdà (11)

Més enllà de l'enginyeria també va realitzar tasques de polític arribant a ser diputat de les Corts per Barcelona el 1850 per una candidatura progressista. Més endavant, el 1868, arribà a la vicepresidència de la Diputació de Barcelona des d'on va contribuir a declarar la Primera República Espanyola el 1873. El 1874 però, essent ara president de la Diputació, dimiteix com a conseqüència del cop d'estat del general Manuel Pavía (12).

A causa de que el seu gran projecte havia estat triat a dit pel Ministeri de Foment espanyol, Cerdà va patir el rebuig de bona part de la burgesia i dels estaments catalans.

Finalment el 1876 mor malalt i mig arruïnat ja que tant l'Estat com l'Ajuntament de Barcelona li devien molts honoraris per les obres realitzades que mai li van fer arribar (12). Va haver de passar més d'un segle per a que el seu treball fos valorat com mereixia.

2.2.2. Pla Cerdà

El pla urbanístic de l'eixample de Barcelona formulat per Ildefons Cerdà estava dotat d'un fort pensament higienista, corrent de l'època que pretenia aconseguir una millora de les condicions de vida de les ciutats i els seus habitants i de la qual Cerdà n'era seguidor, i d'una profunda visió de futur com s'explicarà més endavant en aquest apartat. A més, com els terrenys a edificar eren jardins i camps, va tenir via lliure per proposar unes construccions des de zero aplicant les seves idees futuristes. L'inici de les obres fou el 4 de setembre de 1860 quan la reina Isabel II col·locà la primera pedra de l'Eixample de Barcelona en el que avui dia es coneix com a Plaça Catalunya (13).

Aquest pla consistia en l'eixamplament de la zona urbanística de Barcelona que, com s'ha comentat, en aquells moments es trobava amb una concentració de gent molt important en una zona reduïda i pretenia aprofitar els espais que vorejaven la ciutat, el districte del que avui es coneix com a Ciutat Vella exclouent la Barceloneta, per a la generació d'espais d'habitatge per a la redistribució de la població. A la figura 5 es pot observar el plànol del pla Cerdà.

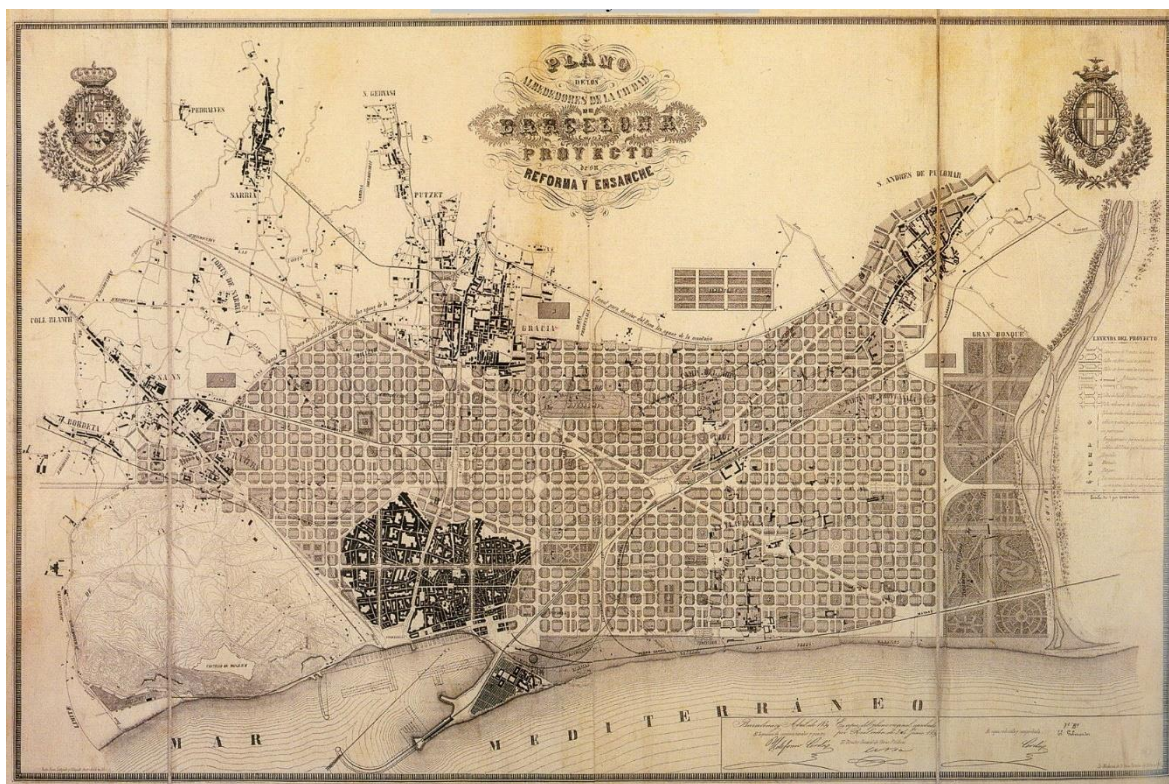


Figura 5. "Plano de los alrededores de la Ciudad de Barcelona. Proyecto de su reforma y ensanche" (6).

A simple vista s'observa que una dels trets més remarcables d'aquest pla és l'estructura ortogonal de la seva malla ja que es veu condicionada per algunes condicions geogràfiques:

1. Els rius Besòs i Llobregat
2. La línia de la costa i de la muntanya
3. L'orientació favorable a les condicions de vida (orientació dels carrers per un millor aprofitament dels corrents d'aire i aconseguir així la higienització que tant necessita una ciutat amb tants habitants).

El projecte d'eixample inicial de la ciutat organitzava la ciutat en una trama homogènia de carrers perpendiculars de mínim 20 metres d'amplada, fet que preveia una futura major densitat del trànsit anys abans de la creació de l'automòbil, que estarien repartits de forma igualitària entre vianants i vehicles. Aquests 20 metres es dividien de manera que 10 metres pertanyien a la calçada i 10 a la vorera, 5 per costat. S'observa una continuïtat lineal a les vies destinades al trànsit que tindrien una llargària de 50 metres.

La quadrícula que componia l'Eixample de Cerdà utilitzava illes de 113,33 metres realitzades de manera octogonal utilitzant els reconeguts xamfrans de 45º i 20 metres de costat per tal d'aconseguir una major visibilitat a les cruïlles pel trànsit futur, sobretot pel transport públic del qual n'era impulsor. Les illes només tindrien edificis construïts a dos dels costats de l'octàgon i al mig de cada un hi hauria un espai verd destinat a la higienització de l'aire i a que els vianants hi poguessin fer vida aïllats de la ciutat. Les edificacions tindrien una alçada màxima de 16 metres, equivalent a 4 pisos. A la figura 6 es pot veure un esbós de com pretenia ser Cerdà que es construís l'Eixample.



Figura 6. Exemple de com pretenia ser el pla Cerdà en un inici (14).

Amb tot això, la capacitat referida al número d'habitants de l'Eixample era molt més elevada en comparació a altres propostes com es pot veure a la taula 1.

	Cerdà	Rovira y Trias
Dimensión máxima trazado ciudad.	7.500 m.	5.000 m.
Longitud máxima de calle recta.	7.500 m.	2.180 m.
Distancia entre cruces.	113,3 m.	100 m.
Vías rápidas.	todas	cada 1.200 m.
Anchura calles.	20, 30 y 60 m.	10 m.
Anchura calles rápidas.	20, 30 y 60 m.	12 m.
Tipología manzana.	edificada sólo a 2 lados	edificada a los 4 lados con patio ce
Pasos peatonales.	entre manzanas	ninguno
Altura máxima.	16 m.	19 m.
Capacidad.	800.000 habitantes	280.000 habitantes

Taula 1. Quadre comparatiu dels plans de Barcelona (10). S'observa el pla Cerdà, l'imposat pel govern central, i el pla de Rovira i Trias, el triat originàriament per l'Ajuntament de Barcelona.

A la taula 2 es mostra un resum d'algunes dades rellevants del pla Cerdà:

Costat illa: 113,3 metres

Amplada carrers ordinaris: 20 metres

Densitat: 250 habitants/hectàrea = 40 m²/persona

1 centre social cada 25 illes

1 mercat cada 100 illes

1 parc urbà cada 200 illes

1 hospital cada 400 illes

Taula 2. Resum de números del Pla Cerdà (5).

En el projecte inicial de Cerdà entenia com a únic possible focus de centralitat al port. Situa la direcció de la Gran Via paral·lela al mar i tangent a Montjuïc, defineix el Paral·lel des de la Creu Coberta fins a les Drassanes i com a continuació de la carretera de Sants i la Meridiana perpendicular al Paral·lel i amb la Diagonal crearà l'enllaç entre els diferents pobles comarcals que, en aquell temps, encara no formaven part de Barcelona. Aquest últim fet va suposar un problema nou en reforçar el paper de

centre urbà de la plaça de les Glòries ja que és la cruïlla on creuen la Diagonal, la Gran Via i la Meridiana (15). A la figura 7 es mostren marcades les vies principals de la ciutat que no segueixen el patró de carrers ortogonals.

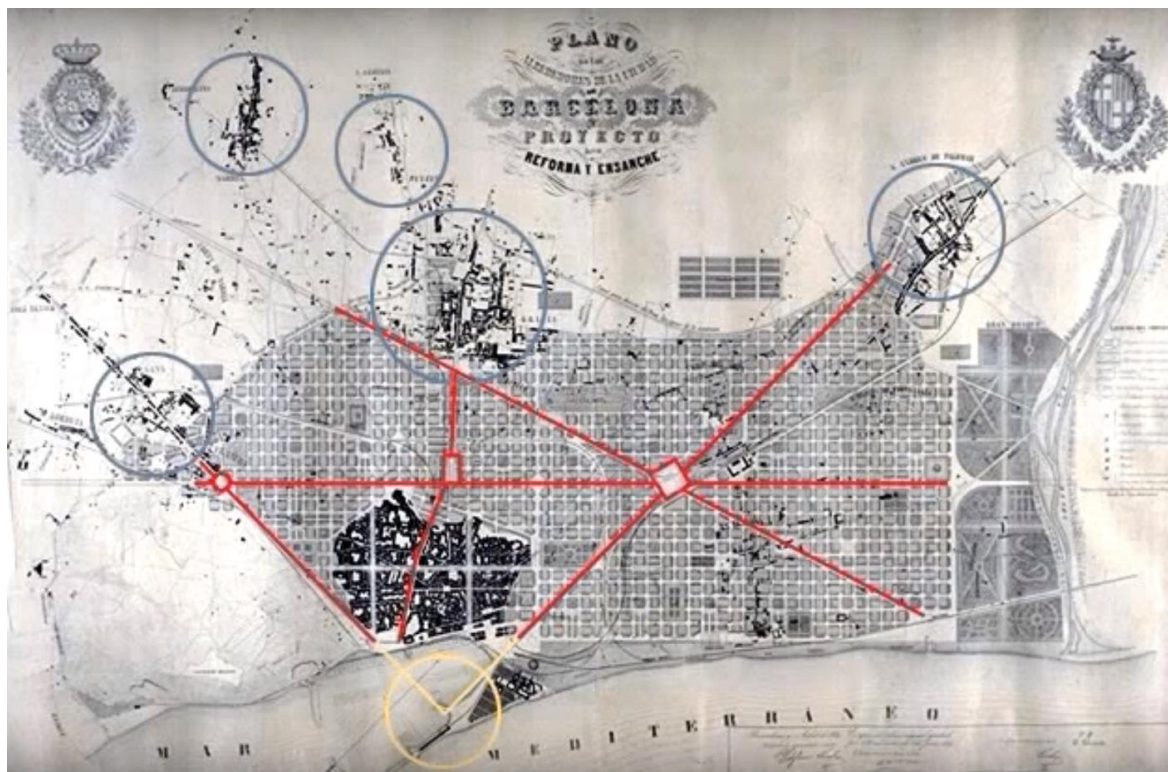


Figura 7. Mostra de la disposició de les vies no ordinàries del Pla Cerdà (15)

L'Ajuntament de Barcelona va intentar mutilar aquest projecte tant com pogués ja que no hi estava d'acord. Els propietaris de les finques on s'havia de construir tampoc eren partidaris d'aquest pla urbanístic i van fer boicot al projecte fins que no es van aprovar un seguit d'ordenances que, segons ells, els permetien un major aprofitament dels terrenys (12). A més a més, durant els primers anys de construcció, les obres avançaven molt lentament per la falta d'infraestructures i no va ser fins la dècada següent de l'inici que van aparèixer fonts inversores que van accelerar el procés. Aquestes aportacions econòmiques però, van contribuir a desvirtuar encara més el pla ja que els inversors buscaven extreure el màxim rendiment econòmic de les terres. Així doncs, moltes de les illes de cases van passar a tenir edificis als quatre cantons i els espais verds es van reduir considerablement. A la figura 8 es pot veure l'evolució de la densificació constructiva de les illes d'edificis de l'Eixample. Tampoc va agradar a estaments catalans de l'època com l'arquitecte Domènech i Muntaner qui va dissenyar l'hospital de Sant Pau en una disposició ostensiblement oposada al pla Cerdà (12) ja que es preveia un pla monòton, gens estètic i que no distingia entre zones riques i pobres de la ciutat.

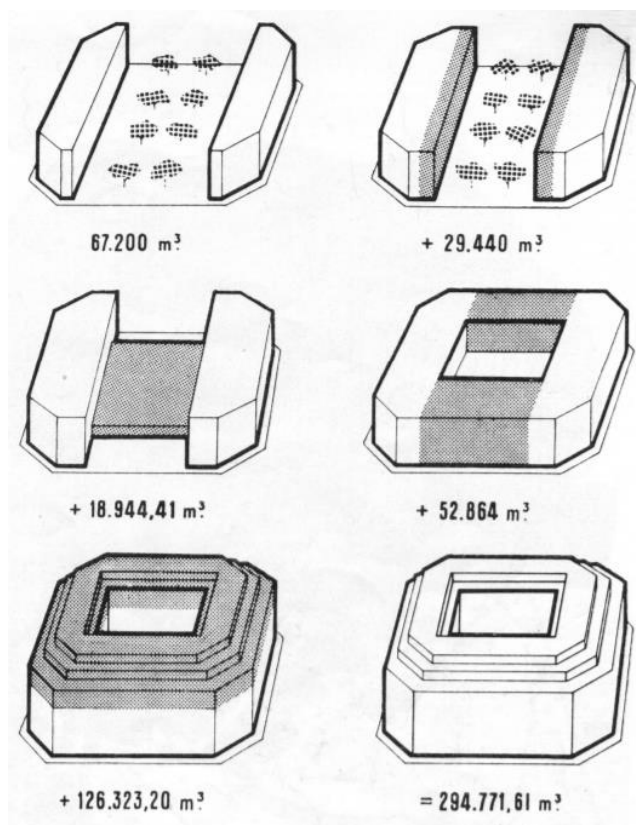


Figura 8. Evolució de la densificació constructiva des del Pla Cerdà fins ara (10).

Tot i així, l'amplitud dels carrers i la característica forma octogonal de les illes de cases van romandre intactes en la construcció.

D'aquesta manera, Cerdà es va anar veient apartat del projecte i va veure com el seu pla, desprestigiats des de l'inici, anava perdent la forma original poc a poc.

2.3. L'Eixample

L'Eixample és un dels 10 districtes de Barcelona fruit de la necessitat d'expansió d'una ciutat on l'ambient era irrespirable.

Actualment és el barri amb major número d'habitants de la ciutat amb 266.416 habitants, un 16,4% del total, i 7.976 edificis que en suposa l'11,3% (16). L'any mitjà de construcció dels edificis de l'Eixample és el 1931 i la majoria d'aquests són construïts abans de la dècada del 1960, moment en el que s'introdueix el formigó armat a la construcció, pel que un gran nombre d'ells tenen inclús més de 100 anys (17) i gairebé el 70% estan fets de maçoneria no reforçada.

Tot i que es construïen separatament, la construcció d'aquests edificis es feia de manera que cadascun compartia càrrega lateral amb els adjacents (a ambdós costats) a ell de manera que les illes d'edificis acabaven actuant com un macro-edifici únic. Aquesta tècnica està present en totes les illes del districte, com es pot veure a la figura 9, seguint el pla urbà dissenyat per Cerdà però adaptat a les demandes dels propietaris de les terres.



Figura 9. Vista aèria de l'Eixample (18)

Més del 90% dels edificis de l'Eixample estan formats per maçoneria no reforçada i formigó armat i tenen una alçada compresa entre 2 i 8 plantes. Es considera que els edificis de maçoneria daten fins el 1940 i a partir d'aquest apareix el formigó armat en la construcció (19).

3. Metodologia

3.1. Mètodes estàtics no lineals (NSP)

Per obtenir les corbes de capacitat s'aplicarà el mètode de procediments estàtics no lineals (NSP) i més en concret es treballarà amb el mètode N2. L'objectiu dels mètodes NSP és obtenir el punt de funcionament d'una determinada estructura davant una demanda plausible. Això s'obté al enfrontar la capacitat de l'estructura amb la demanda a la que es veu sotmesa. Tots els mètodes tenen l'origen en el mètode l'espectre de capacitat (CSM) introduït per primer cop als anys 70 i que forma part del document ATC-40 (20).

3.1.1. El mètode de l'espectre de capacitat CSM, ATC-40

Els NSP utilitzats avui en dia estan tots basats en el mètode ATC-40 però s'han anat actualitzant i millorant amb el pas del temps. La principal diferència entre uns i altres es troba en el tractament del punt de funcionament ja que li apliquen diferents criteris de definició.

El mètode de l'espectre de capacitat (CSM) fou proposat originàriament per Sigmund A. Freeman durant els anys 70 i incorporat posteriorment el 1996 al document ATC-40 (20). Aquest mètode compara la capacitat d'una estructura a resistir càrregues laterals amb la demanda que s'extreu d'un espectre de resposta (21). El procediment de l'ATC-40 consisteix en:

- (i) realitzar l'anàlisi *pushover* determinant la corba de capacitat (tallant a la base en funció del desplaçament al sostre) i convertir-la en espectre de capacitat en termes d'acceleració-desplaçament AD (sistema equivalent amb un únic grau de llibertat);
- (ii) dibuixar l'espectre de demanda al mateix gràfic amb la del punt (i), també en termes d'AD;
- (iii) suposar un punt de funcionament o *performance point* PP i la pseudo-acceleració corresponent del diagrama de capacitat;
- (iv) realitzar els càlculs per trobar els factors de reducció espectral i dibuixar l'espectre de demanda juntament amb el de capacitat;
- (v) comprovar si es creuen les dues corbes: si no ho fan suposar un nou PP i tornar al punt (iv); si coincideixen en algun punt, el PP és el suposat al punt (iii) i el desplaçament corresponent representa el màxim que patiria l'estructura per la demanda imposada.

3.1.2. El mètode N2

El mètode N2 fou originalment proposat per Fajfar el 1996 (22) i inclòs en el Eurocodi 8 el 2004 (23). És una variant del mètode ATC-40 que, en comptes d'un espectre fortament esmorteït, utilitza una relació $R-\mu-T$ (21).

Aquest mètode consisteix en convertir la corba de capacitat, el tallant aplicat a la base en funció del desplaçament al sostre de l'edifici, obtinguda a través d'un anàlisi pushover des d'un sistema de múltiples graus de llibertat en un equivalent d'un sol grau de llibertat. Aquest pas té l'objectiu de comparar aquest espectre de capacitat obtingut amb el de demanda i així trobar el punt de treball PP de l'estructura al creuar-los. Aquest punt de treball indica el comportament de l'edifici davant d'aquesta demanda imposada.

Les corbes de capacitat permeten identificar la distribució dels diferents estats de dany prèviament definits. Amb el PP es pot entrar a aquestes corbes i identificar, per a l'estructura desitjada, quins percentatges de dany li corresponen i, amb això, determinar en quines condicions es trobaria amb la demanda especificada.

3.2. Fragilitat, projecte Risk-UE

L'objectiu d'aquest treball requereix la definició dels estats de dany que es considera que pot patir l'edifici a avaluar.

Per aquest treball s'aplica el mètode exposat al projecte Risk-UE (3) proposat per Milutinovic i Trendafiloski el 2003. Els estats de dany definits són 4:

1. Lleuger
2. Moderat
3. Sever
4. Col·lapse

També existeix l'estat de dany 0 que correspon a l'estat nul. Aquests estats de dany seran definits segons el punt de fluència i el punt últim de l'espectre de capacitat obtingut.

Per cada estat de dany, la corba de fragilitat defineix la probabilitat d'igualar o superar-lo. La corba d'estat 0 es unitària ja que correspon al 100%, la resta queden definides per una distribució normal logarítmica (17) definida per l'equació següent, extreta de la font (24):

$$P(DS \geq DS_k | S_k) = \Phi \left(\frac{1}{\beta_k} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d_k}} \right) \right) \quad k = 1 \dots 4$$

On:

- Φ : funció normal logarítmica estàndard acumulada
- Sd : desplaçament espectral
- \overline{Sd}_k : valor mig de desplaçament espectral que per cada estat es defineix: $\overline{Sd}_1 = 0.7D_y$; $\overline{Sd}_2 = D_y$; $\overline{Sd}_3 = D_y + 0.25(D_u - D_y)$ i $\overline{Sd}_4 = D_u$
- β_k : desviació estàndard

Sd_k i β_k són valors estimats obtinguts de l'espectre de capacitat bilineal. Per avaluar la desviació estàndard s'assumeix que el dany de l'estructura segueix una distribució binomial (25). Una manera més precisa de trobar els valors de β_k es pot trobar a (4).

Així doncs, per obtenir les probabilitats d'excedir un estat de dany, s'ha d'introduir el desplaçament espectral que defineix el PP a la corba de fragilitat corresponent a cada edifici i cada escenari sísmic. A partir de les probabilitats d'excedir un estat de dany, es poden obtenir les probabilitats de succeïment del mateix estat.

Com a indicador del dany global esperat de l'estructura s'ha seleccionat l'índex de dany (DI). Aquest valor serveix com a còmput de les corbes de fragilitat. El DI es pot definir a partir de les probabilitats d'aparició de cada estat de dany calculades prèviament de les corbes de fragilitat amb la fórmula:

$$DI = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^4 k \cdot P_k$$

i l'estat mitjà de dany D_m es pot calcular segons:

$$D_m = \sum_{k=0}^4 k \cdot P_k$$

El valor de l'índex de dany es troba en el rang [0-1] on el valor 0 indica l'absència de dany a l'estructura i el valor 1 (100%) implica el dany total o col·lapse de l'estructura. Finalment, amb el paràmetre $d = D_m/4$ es defineix la distribució de dany binomial i aquest mateix paràmetre permet recuperar les probabilitats d'aparició de cada estat de dany.

Amb aquest mètode es troben les corbes de fragilitat i amb aquestes la probabilitat que cada estat de que l'edifici pateixi cada estat de dany prèviament definit. A la figura 10 es mostra un exemple de corba de fragilitat que mostra la probabilitat d'excedència de cada estat segons el desplaçament espectral i un histograma amb la probabilitat de succeïment de cada estat de dany que es pot obtenir fàcilment a partir de la probabilitat d'excedir cada estat de dany.

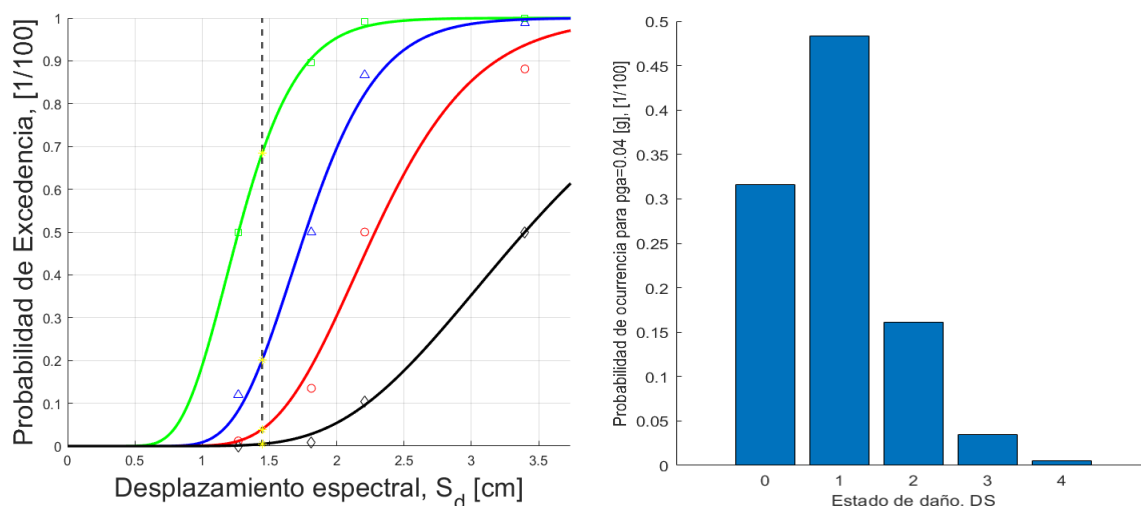


Figura 10. Corba de fragilitat i histograma amb les probabilitats de cada estat de dany. Ambdues figures pertanyen al model individual avaluat i a la direcció Y positiva. La línia discontinua senyala el desplaçament espectral pel PP trobat.

3.3. Espectre de demanda

Per definir la demanda sísmica que s'aplicarà en els models estructurals s'aplicarà els valors d'acceleració específics per la ciutat de Barcelona que defineix la Norma de Construcció Sismoresistent NCSE-02 (26). Existeixen altres espectres com l'exposat a l'Eurocodi 8 (23) o algun de més específic per la ciutat de Barcelona com el proposat per Irizarry (1) però, com no és objecte del present treball la comparativa d'espectres, s'aplicarà el de la normativa espanyola.

La norma NCSE-02 és aplicable a qualsevol edifici de nova creació i s'ha de tenir en compte en rehabilitacions i reformes. Aquesta norma defineix tres tipus de construccions segons la seva importància:

1. De importància moderada: aquelles amb probabilitat menyspreable de que un terratrèmol pugui ocasionar víctimes, interrompre un servei primari o produir danys econòmics significatius a tercers.
2. De importància normal: aquelles que, si són destruïts per un terratrèmol, poden donar lloc a víctimes, interrompre un servei per a la col·lectivitat o produir importants pèrdues econòmiques sense que es tracti d'un servei imprescindible ni pugui donar lloc a efectes catastròfics.
3. De importància especial: aquelles la destrucció per terratrèmol de les quals pot interrompre un servei imprescindible o ocasionar efectes catastròfics.

3.3.1. Mapa de perillositat sísmica

A l'Estat espanyol, la perillositat sísmica d'un terreny es defineix seguint el mapa de la figura 11. Aquest mapa mostra els valors d'acceleració bàsica a_b expressada en relació al valor de la gravetat g , valor característic de l'acceleració horitzontal del terreny i el coeficient de contribució K que té en compte la influència dels diferents tipus de terratrèmols esperats en la perillositat sísmica de cada terreny (26).



Figura 11. Mapa sísmic de la norma NCSE-02 (26).

Pel que fa a la ciutat de Barcelona s'observa una $a_b = 0,04g$.

La mateixa norma també classifica els terrenys en quatre tipus explicats a la taula 3 segons la compacitat del terreny del sòl (de més a menys compacitat) i on la velocitat de propagació de les ones elàstiques transversals o de cisalla del terratrèmol v_s disminueix.

Tipus de terreny	Descripció	Velocitat, v_s	Coefficient de terreny, C
I	Roca compacta, sòl cimentat o granulat molt dens.	$v_s > 750 \text{ m/s}$	1,0
II	Roca molt fracturada, sòls granulars densos o cohesius durs.	$750 \text{ m/s} \geq v_s \geq 400 \text{ m/s}$	1,3
III	Sòl granular de compacitat mitjana o sòl cohesiu de consistència molt ferma.	$400 \text{ m/s} \geq v_s \geq 200 \text{ m/s}$	1,6
IV	Sòl granular lliure o sòl cohesiu tou.	$v_s \leq 200 \text{ m/s}$	2,0

Taula 3. Classificació dels tipus de terreny segons la norma NCSE-02.

El cas de l'Eixample barceloní el tipus de terreny és el III, pel que es considera un coeficient C de 1,6.

3.3.2. Escenari sísmic

La ciutat de Barcelona es considera d'una perillositat sísmica baixa i amb una intensitat VI-VII a l'escala d'intensitat macrosísmica MSK per un període de retorn de 500 anys.

Pel que fa a la demanda, la norma que definirà l'espectre de demanda aplicada a les construccions del present treball és la norma espanyola NCSE-02.

3.3.2.1. Acceleració sísmica de càlcul

L'acceleració sísmica de càlcul a_c es defineix amb el producte:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

On :

- a_b : acceleració sísmica o *peak ground acceleration* (PGA), segons la figura 11 per a Barcelona $a_b = 0.04g$
- ρ : coeficient adimensional de risc, per a les construccions del treball $\rho = 1,0$
- S : coeficient d'amplificació del terreny, per a Barcelona $S = C/1,25$ on C dependrà del tipus de terreny exposats a la taula 3. En el cas de l'Eixample $C = 1,6$.

3.3.2.2. Espectre de resposta elàstica

Com estableix la norma NCSE-02, l'espectre de resposta elàstica normalitzat en la superfície lliure de terreny per acceleracions horitzontals, corresponent a un oscil·lador lineal simple amb un esmoreïment de referència del 5% respecte al crític, està definit pels següents valors:

$$\text{Si } T < T_A \quad Sa(T) = 1 + 1,5 \cdot T/T_A$$

$$\text{Si } T_A \leq T \leq T_B \quad Sa(T) = 2,5$$

$$\text{Si } T > T_B \quad Sa(T) = K \cdot C/T$$

Essent:

- $Sa(T)$ o $\alpha(T)$: valor de l'espectre normalitzat de resposta elàstica
- T : període propi de l'oscil·lador en segons.
- K : coeficient de contribució.
- C : coeficient del terreny. S'adoptarà com a valor de C la mitjana de cada valor C_i de cada estrat amb el seu gruix e_i , en metres segons: $C = \frac{\sum C_i \cdot e_i}{30}$
- T_A, T_B : períodes característics de l'espectre de resposta de valors $T_A = K \cdot C/10$ i $T_B = K \cdot C/2,5$

A la figura 12 es pot veure un exemple d'espectre de resposta elàstica que compleix amb la definició de la funció a trossos.

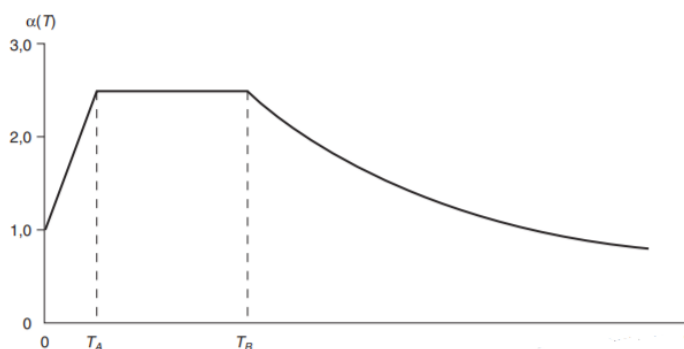


Figura 12. Exemple d'espectre de resposta elàstica (26).

3.4. Procediment

Aquesta secció té l'objectiu d'explicar els mètodes de càlcul aplicats per obtenir la vulnerabilitat sísmica de dos edificis típics de maçoneria no reforçada ubicats al districte de l'Eixample de Barcelona.

La metodologia aplicada consistirà en:

- i. Definició model estructural
- ii. Procediment estàtic no lineal
 - a. Anàlisi modal
 - b. Anàlisi pushover
- iii. Anàlisi de la fragilitat

L'anàlisi del risc per aquests edificis es fa aplicant el mètode de l'espectre de capacitat (27).

La definició del terratrèmol seguirà la normativa de construcció sismoresistent NCSE-02 presentada el 2009 per la Comissió Permanent de Normes Sismoresistents del Ministeri de Foment espanyol. La mateixa norma també defineix que, per un model pla d'estructura de pisos es consideraran 3 modes de vibració (figura 13) amb contribució significativa en el procediment de càlcul.

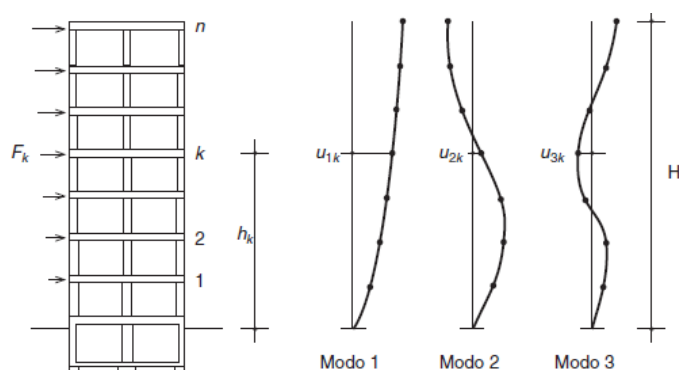


Figura 13. Modes de vibració en models plans d'estructures de pisos (26).

Els edificis quedaran definits per l'espectre de capacitat bilineal, trobats a través del seu punt de fluència (D_y , A_y) i pel punt de capacitat última o de ruptura (D_u , A_u).

Per tenir en compte la resposta inelàstica de l'estructura, l'espectre de resposta elàstic es reduirà per obtenir-ne l'inelàstic, anomenat espectre de demanda.

Un cop obtinguts l'espectre de demanda i l'espectre de capacitat, ambdós es superposaran en un mateix gràfic i el punt de creuament definirà el punt de treball o *performance point* PP, que definirà el desplaçament espectral S_d que el sisme aplicat produiria a l'edifici utilitzat.

El següent pas consisteix en obtenir l'estat de dany de l'edifici un cop superat el terratrèmol. Això s'aconsegueix a través de les corbes de fragilitat. Aquest mètode considera els 5 estats de dany ja comentats: nul, lleuger, moderat, sever i col·lapse.

3.4.1. Corbes de capacitat i de fragilitat

Per obtenir l'espectre de demanda el que es farà es seguir el mètode estàtic no lineal N2 que consisteix en trobar la corba de capacitat aplicant un anàlisi modal i un de pushover i seguidament transformar-lo en l'espectre de capacitat per tal de comparar-lo amb l'espectre de demanda i trobar el desplaçament espectral a partir del punt de funcionament.

Per les corbes de fragilitat el que s'aplicarà és el mètode proposat al projecte europeu sobre el risc dels terratrèmols RISK-UE (3).

3.4.1.1. Definició model estructural. Programa TREMURI

El primer que cal fer és definir el model estructural. En aquest cas es disposa de models estructurals dels edificis a estudiar que s'introdueixen com a dades al programari Tremuri on s'acabarà de definir el model de problema. Els models estructurals utilitzats van ser desenvolupats pel Departament de Resistència de Materials i posats a disposició per aquest treball pel director del mateix. Aquests models es van obtenir a partir de plànols originals, visites presencials i l'opinió d'experts.

Tremuri és un software desenvolupat a la Universitat de Gènova i creat per especialistes del Departament de Tècniques de la Construcció de la mateixa universitat dirigits pel professor Sergio Lagomarsino i que van definir els aspectes teòrics de Tremuri amb experiments en laboratori i amb anàlisis en estructures reals. Aquest programa permet l'estudi tridimensional d'edificis amb el mètode estàtic no lineal per estructures construïdes en maçoneria i materials mixtes, avalua els principals modes de col·lapse dels models que se li introdueixen i es basa en elements macro. Està ideat de manera que, basant-se en hipòtesis mecàniques, té en compte els dos modes principals de falla de la maçoneria: la flexió i la cisalla incloent els mecanisme de fricció. Així doncs, té en compte l'evolució del dany causat a l'edifici controlant el deteriorament de la força o la degradació de la rigidesa.

En aquest treball s'avaluarà dos models: un edifici de manera individual (E01) i un de l'agregat de dos edificis idèntics entre ells (E01 + E01, nomenat com AG01). L'edifici E01 consta de 7 plantes o nivells pel que fa a Tremuri i està construït amb maçoneria no reforçada. L'agregat AG01 és la suma de dos models E01, pel que les propietats i dimensions seran les mateixes que pel model E01 en els dos edificis.

3.4.1.1.1 Propietats mecàniques del model



Els efectes de certes incerteses descrites com a variables aleatòries s'han de tenir en compte l'avaluació probabilística de qualsevol estructura per obtenir una millor aproximació al comportament real. El número, tipus i grau d'influència d'aquestes incerteses poden variar considerablement d'un model estructural a un altre depenent de la ubicació, els mètodes de construcció, etc. (28). És per això que les propietats mecàniques donades al material s'han obtingut en base a la recopilació i tractament de diversos recursos, documents i assajos com el descrit a (28) d'on s'han extret els valors que descriuen els materials utilitzats als models a calcular. A la taula 4 es mostren els valors utilitzats per descriure les propietats mecàniques del material. Aquests són el mòdul de Young E , el mòdul de cisalla G , la tensió a cisalla τ_0 , la resistència a la compressió f_m .

Variable d'interès	Valor	Unitats
E	1500	MPa
G	500	MPa
τ_0	0.09	MPa
f_m	3.00	MPa

Taula 4. Propietats mecàniques de la maçoneria aplicades al model a estudiar.

3.4.1.2. Anàlisi modal

Un cop completament definit el model estructural, es produeix a realitzar el càlcul amb el mateix 3Muri. Amb això s'aconsegueixen els valors de desplaçament en funció de la càrrega lateral aplicada. Aquestes dades doncs, passen a ser post-processades per obtenir els modes de vibració i el percentatge de massa desplaçada en cada cas. Normalment es considera que els dos primers modes han de moure el 80% de la massa total.

Al punt 5.1 es mostren les propietats modals principals pels tres primers modes de vibració. Aquestes són: la massa de l'edifici, el període i el percentatge de massa desplaçada en cadascuna de les direccions utilitzades.

3.4.1.3. Anàlisi pushover

La capacitat de resistència a un sisme d'un edifici s'obté a partir de l'anàlisi estàtic no lineal o *pushover*. Per aquest pas també s'obtenen els resultats amb el 3Muri i després són processats al Matlab.

Aquest anàlisi consisteix en l'aplicació de forces laterals al model estructural que augmenten gradualment fins que aquest col·lapsa. El patró de forces aplicades és correlatiu als modes de vibració fonamentals i s'ha aplicat als eixos X i Y i en sentits positiu i negatiu per ambdues direccions. El mateix procés s'ha aplicat al model individual i a l'agregat.

El 3Muri el que fa es controlar l'esforç tallant aplicat a la base (V_{base}) i el desplaçament obtingut a la part superior del model o terrat de l'edifici (d_{roof}) amb el que s'obté la corba de capacitat per cada anàlisi dut a terme. Aquesta corba de capacitat és comuna per a tots els NSP. Per transformar-la en la forma d'espectre bilineal i poder fer la comparació amb l'espectre de demanda més endavant s'aplicarà el mètode N2 que consisteix en obtenir un equivalent de la corba de capacitat obtinguda, corresponent a múltiples graus de llibertat (*multiple degrees of freedom*, MDOF), a un sistema d'un sol grau de llibertat (*single degree of freedom*, SDOF o ESDOF).

3.4.1.4. Anàlisi de la fragilitat

El mètode proposat al projecte RISK-UE (3), explicat al punt 3.2, és l'aplicat per trobar les corbes de fragilitat necessàries per obtenir la probabilitat de succeïment dels estats de dany. Els paràmetres que defineixen cada corba de fragilitat segons el model estructural i la direcció d'aplicació de la càrrega són el punt últim (D_u , A_u) i el punt de fluència (D_y , A_y).

4. Edificis

El barri de l'Eixample de Barcelona presenta patrons constructius repetitius al llarg de tot el districte mantenint les mateixes proporcions variant bàsicament en les façanes. La majoria d'aquests estan construïts amb obra de fàbrica de maó, també anomenada maçoneria. El període de construcció d'aquests edificis compren del 1860 al 1940 (17) època en la qual la fabricació dels productes que conformen la maçoneria era totalment manual i amb eines rudimentàries (abraçadors de maó o fusta) pel que les propietats dels materials variaven bastant segons diferents factors com la ubicació al forn durant la cocció i la manca de control sobre les peces un cop iniciada (28). Aquest fet comportava grans fluctuacions en les característiques i la qualitat del producte final.

Moreno (19) i Bonett (29) a les seves tesis doctorals descriuen les principals característiques dels materials utilitzats en la construcció d'edificis de maçoneria no reforçada. Els materials són panells de maçoneria, que es considera que estan fets de maons i morter. Els dos autors també mostren les propietats mecàniques de la maçoneria com són la resistència a la cisalla, a la tracció i a la compressió i el comportament sota l'aplicació de càrregues dinàmiques.

Existeixen dos tipus d'edifici pel que fa a les illes de l'Eixample: el de banda i el de cantonada o xamfrà. Els primers són edificis simples rectangulars amb una construcció a dreta i esquerra d'aquest. Els segons són edificis que donen la forma característica de les illes d'edificis, és a dir, tenen base pentagonal i formen 45 graus de desviació amb els carrers.

Les estructures dels edificis consisteixen en elements resistents de transmissió de càrrega que consisteixen en murs de suport tot i que sobretot a la planta baixa i l'entresol també existeixen pilars de maçoneria o de ferro colat. En molts dels habitatges de l'Eixample les primeres plantes s'acostumen a fer servir per a locals comercials o d'oficina pel que en aquestes és habitual trobar pilars i bigues metàl·liques que permeten disposar d'un ampli espai obert i d'una elevació major com es pot veure a la figura 16. Els principals murs de càrrega d'aquestes estructures són la façana, els patis interiors i les parets mitjaneres de contacte entre edificis adjacents. Tant els patis interiors com les façanes poden ser de 30, 45 o fins a 60 cm de gruix, un gruix elevat ja que disposen d'àmplies obertures com portes i finestres. Aquestes obertures interiors donen lloc a llindes o parapets de dimensions variables, que són una font d'esquerdes a causa de moviments diferencials, ja que les seccions de mur que queden per sobre són extremadament dèbils. Les parets de contacte amb altres edificis són de 15 cm. Els fonaments de l'edifici són poc profunds i en els edificis més vells estan formades per coixinets de superfície sota els murs i en els més nous són sabates situades sota els pilars de formigó. Pel que fa als terres de l'edifici són unidireccionals amb bigues curtes i lleugeres formades per voltes ceràmiques. Antigament s'usaven bigues de fusta però, més recentment, s'han introduït les bigues de formigó armat. Aquestes configuracions es poden veure a la figura 14.

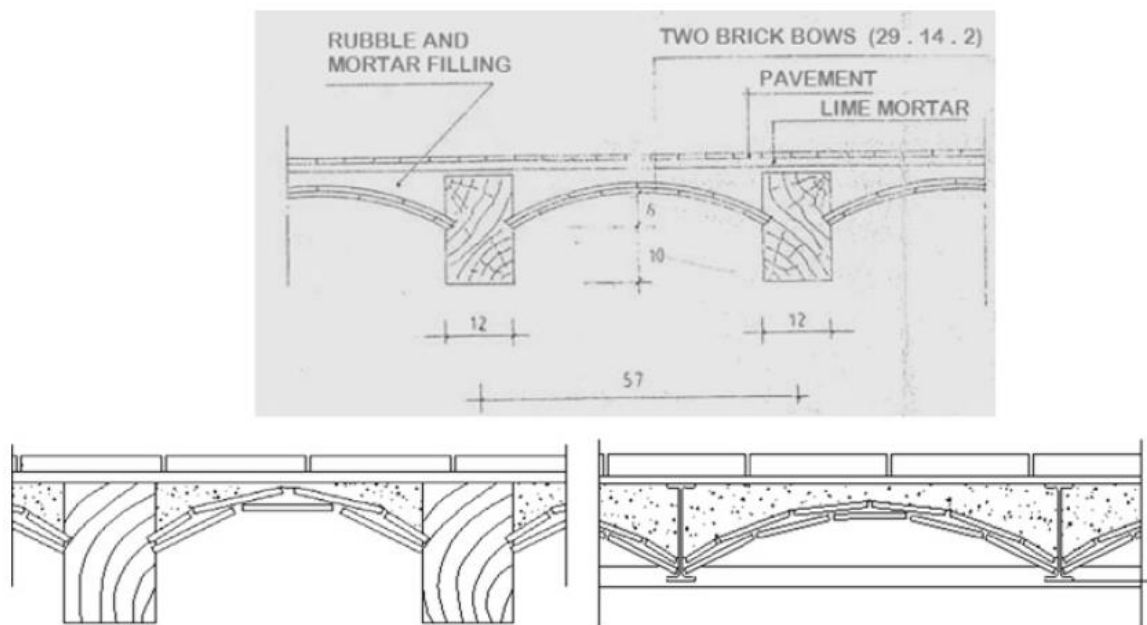


Figura 14. Il·lustració de terres típics. es mostra un esbós de plànol antic (superior) i esquemes basats en esbossos originals de bigues de fusta (esquerra) i metàl·liques (dreta). En els 3 casos es mostren les voltes de ceràmica (17).



Figura 15. Illa d'edificis típica de l'Eixample (30)



Figura 16. Exemple de part frontal edifici de l'Eixample. Es pot veure com la primera planta disposa d'una altura més elevada que les següents (17).

Aquests edificis es construïen de manera que es recolzaven amb els edificis contigus tot i ser construccions independents. Aquest fet comporta que les càrregues dels edificis adjacents es vegin repartides en part entre uns i altres provocant així que tota l'illa d'edificis es comporti com un de sol com es pot veure a la figura 15. A la Figura 17 es pot veure el detall dels “nervis” de dos edificis de l'Eixample on s'ha retirat l'edifici contigu.

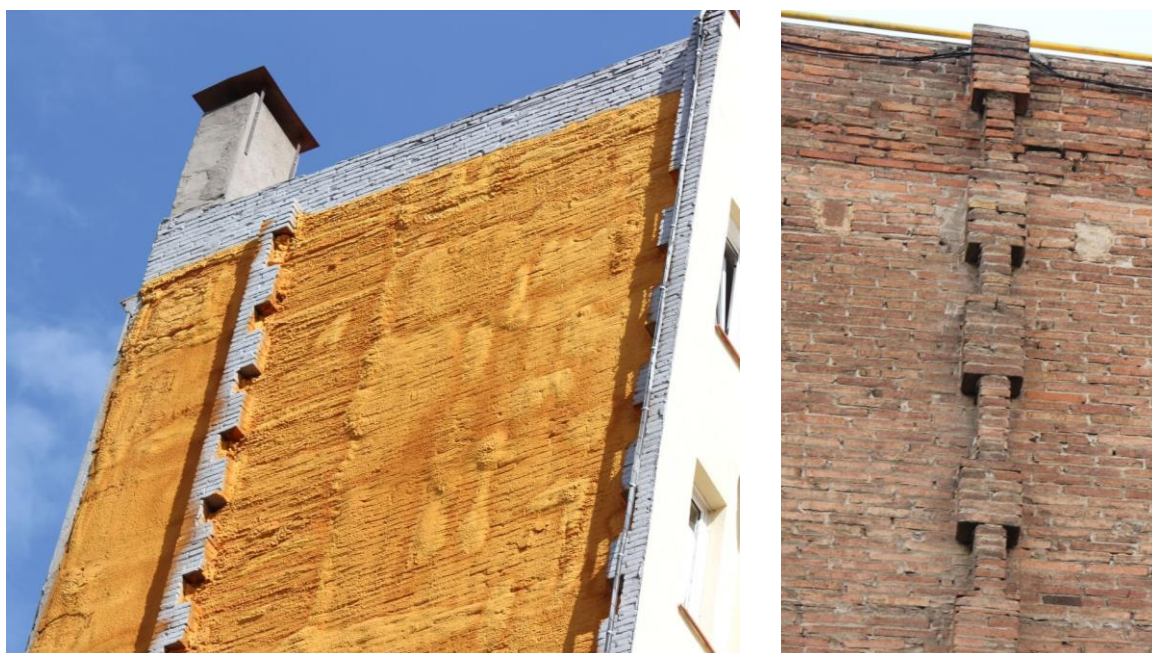


Figura 17. Detalls del nervi de dos edificis de l'Eixample (31).

4.1. Edifici model

Els models avaluats en aquest treball s'han obtingut en base a plànols d'edificis reals i han sigut desenvolupats i posats a disposició pel projecte pel Departament de Resistència de Materials de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Es tractarà amb un edifici de centre i un agregat de dos edificis idèntics iguals al model individual. Com s'ha comentat, els models estan basats en edificis reals i l'agregat, al tractar-se dos edificis idèntics que es troben paret amb paret, donarà una mostra pura de com actua la transmissió entre dos edificis sota un esforç lateral. D'aquesta manera s'avaluarà el comportament de l'edifici tant de manera aïllada com en agregat.

L'edifici individual se l'ha anomenat E01 i a l'agregat AG01. A la figura 18 es pot veure el model 3D dels edificis en imatges extremitats del programa Tremuri. Així doncs les principals dimensions del model E01 són 16 metres d'amplada de façana, 24.5 metres d'alçada i 31.473 metres de profunditat i té construït 7 pisos.

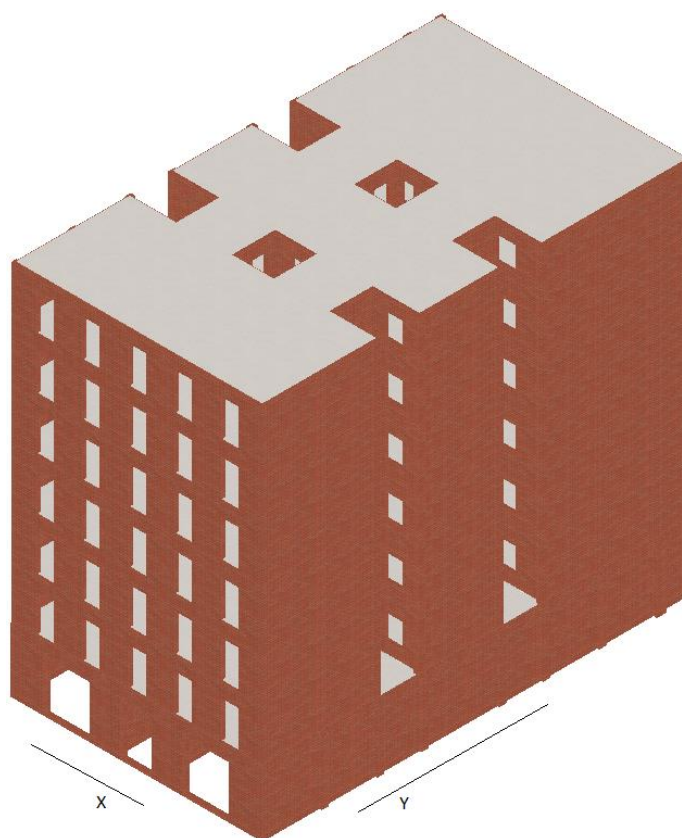


Figura 18. Model 3D de l'edifici agregat. S'hi poden veure senyalades les direccions que defineixen l'aplicació de la demanda, X i Y.

El model consta de dos tipus de pis: el de planta baixa i el pis tipus que suposa els 6 restants que són pràcticament iguals. Pel que fa a la planta baixa té una alçada de 4 m, un gruix de façana frontal de 45 cm i el gruix de les parets laterals i del pati interior és de 15 cm. A més a més, té tres tipus de columnes de maçoneria de 45 x 40 cm, 45 x 45 cm i 45 x 60 cm. Els pisos tipus tenen una alçada de 3.2 m a excepció de l'últim que és de 3.1 m, el gruix de la façana frontal en els mateixos és de 30 cm i el de les parets laterals i pati interior de 15 cm. A la figura 19 es pot trobar el model CAD del pis tipus i de la planta baixa de l'edifici individual i a la figura 20 el mateix però extret del programa Tremuri. Per la visualització de la planta baixa de la figura 20 es poden veure en color gris les bigues metàl·liques només presents en aquesta planta per aconseguir la major quantitat possible d'espai obert en aquesta. Pel pis tipus en canvi, es veu que només existeixen materials de maçoneria i l'existència de columnes com a elements resistents.

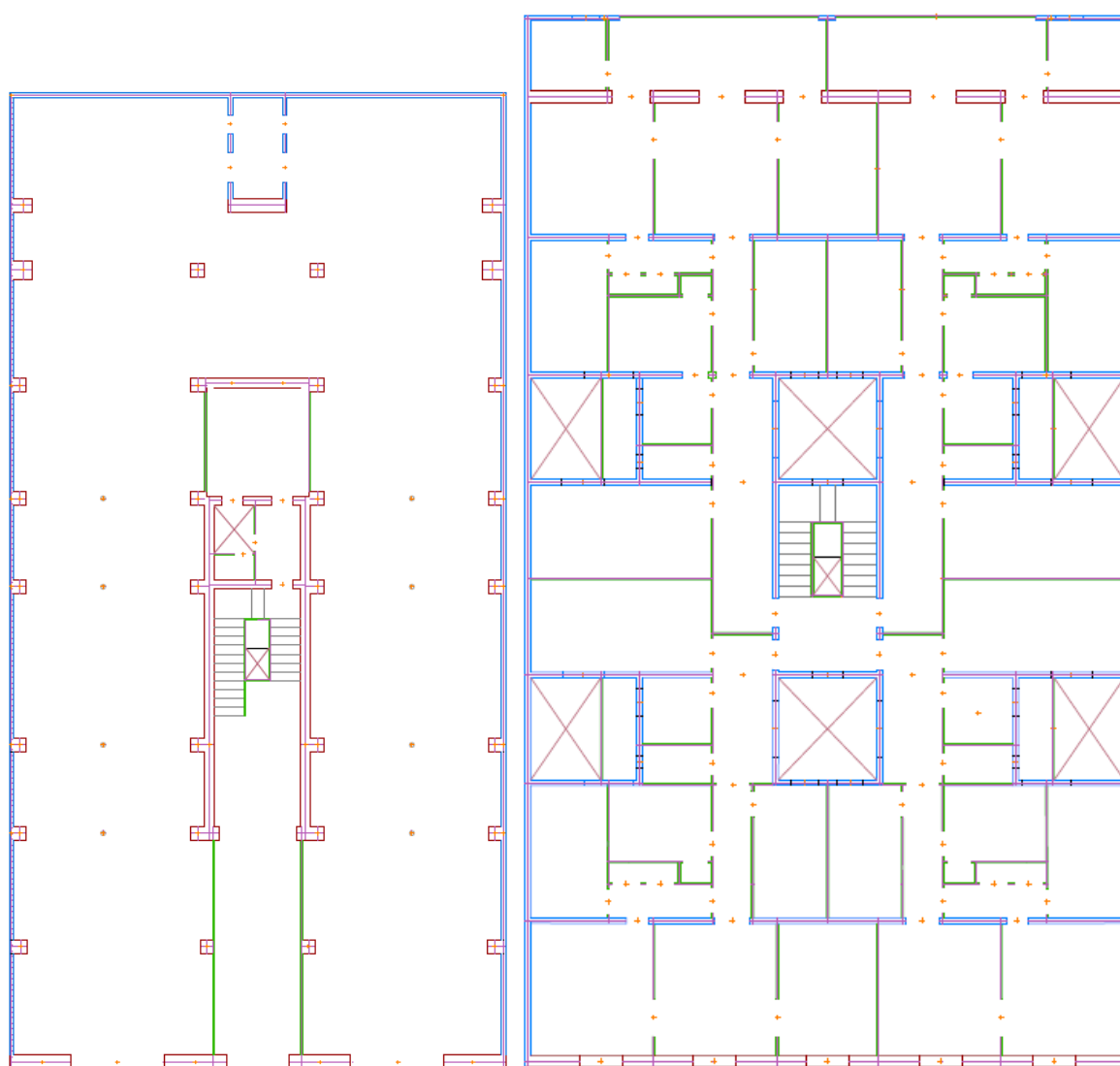


Figura 19. Models CAD de l'edifici individual. S'observa la planta tipus a l'esquerra i la planta baixa a la dreta.

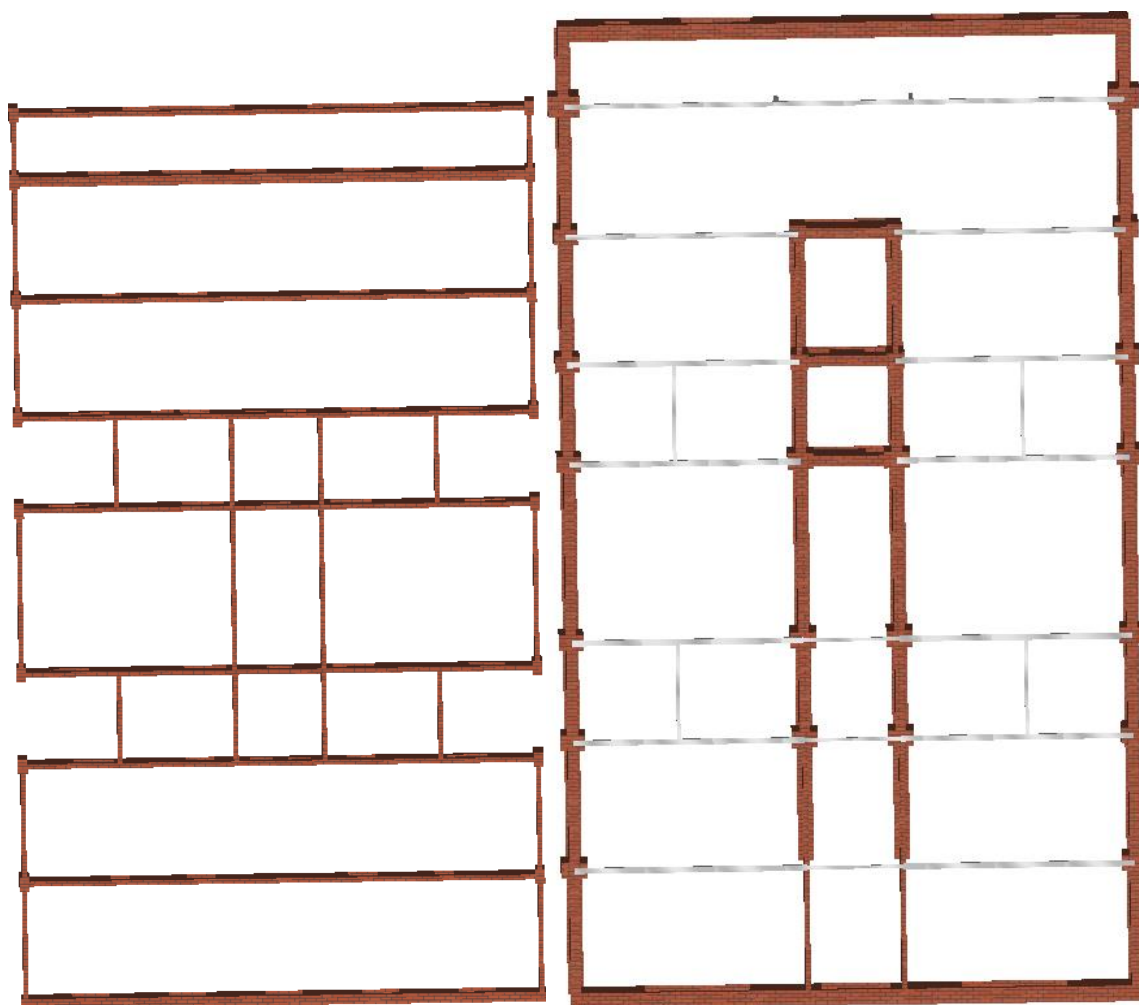


Figura 20. Vista en planta del pis tipus a l'esquerra i de la planta baixa a la dreta del programa Tremuri.

5. Càlculs i resultats

Finalment, mitjançant els programaris Tremuri (32) i Matlab (33), es poden obtenir els resultats de cada anàlisi i mètode explicats en els apartats anteriors. Per cada subapartat s'ha realitzat l'anàlisi del model individual i de l'agregat en les dues direccions i sentits.

5.1. Anàlisi modal

Amb el Tremuri es realitza l'anàlisi modal que indica la quantitat de massa desplaçada i el període de temps per a cada mode de vibració. A les taules 5 i 6 es poden veure els tres primers modes de vibració obtinguts a través de l'anàlisi modal. En aquestes taules es mostra el mode de vibració, el període de temps de vibració i la quantitat de massa desplaçada en número i tant per cent i en ambdues direccions d'estudi, X i Y. Es considerarà que un mode de vibració és significatiu quan desplaci més de l'1% de massa. A les mateixes taules es pot observar que els tres primers modes de vibració vàlids desplacen més del 80% de massa, amb el que es comprova que el seu comportament atén principalment a aquest mode en ambdues direccions. La resta de modes desplacen una massa menyspreable en comparació.

Direcció	X		Y	
T [s]	m _x [kg]	M _x [%]	m _y [kg]	M _y [%]
0,74382	2.139.460	84,24	2	0,00
0,64896	73.898	2,91	2	0,00
0,26113	250.129	9,85	54	0,00

Taula 5. Anàlisi modal del model individual, E01. Es mostren els 3 primers modes de vibració per l'eix X.

Direcció	X		Y	
T [s]	m _x [kg]	M _x [%]	m _y [kg]	M _y [%]
0,77007	2	0,00	1.889.445	74,4
0,25691	37	0,00	353.718	13,93
0,1505	2	0,00	108.943	4,29

Taula 6. Anàlisi modal del model individual, E01. Es mostren els 3 primers modes de vibració per l'eix Y.

Pel que fa al període obtingut, ajuda a obtenir una primera idea sobre el tipus de dany que pot assolir el model si s'aplica sobre el gràfic de l'espectre de demanda com el de la figura 12, és a dir, dona el valor de l'acceleració espectral que patirà l'edifici per cada mode.

5.2. Anàlisi *pushover*

Amb l'anàlisi *pushover* s'aconsegueixen les corbes de capacitat. Totes les taules i gràfiques d'aquest apartat són fonts pròpies a partir del codi cedit pel Departament de Resistència de Materials de la Universitat Politècnica de Catalunya.

5.2.1. Corbes de capacitat

Per cada model s'obtenen quatre corbes, la primera representa les dades extreteres del Tremuri que constitueix el sistema MDOF, la segona mostra l'equivalent del sistema MDOF al de SDOF, la tercera que dibuixa l'espectre de capacitat i la quarta s'utilitzarà per comparar l'espectre de capacitat passat a forma bilineal amb l'espectre de demanda. Totes aquestes es poden trobar a l'annex A separades per cada model, direcció i sentit.

Una bona representació de corba de capacitat es mostra a la figura 21. En aquesta s'observa la corba extreta directament del Tremuri i l'equivalent trobada post-processant-la i en la figura 22 es pot trobar l'espectre de capacitat marcat com a "Pushover SDOF" obtingut aplicant el mètode N2.

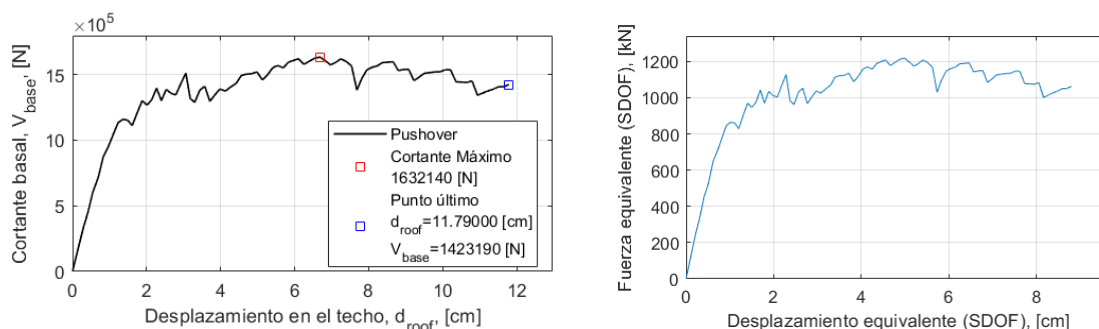


Figura 21. Corbes de capacitat en sistemes MDOF (esquerra) i SDOF (dreta) pel model individual en la direcció X positiva.

En quant a les corbes de capacitat, primerament el model té un comportament elàstic bastant regular seguit del comportament plàstic un cop arriba a la zona de fluència. Com les gràfiques del sistema MDOF i SDOF són equivalents i la de l'espectre de capacitat n'és derivada, el comportament és el mateix en les tres.

Pel que fa a la superposició de la demanda amb la capacitat, a la figura 22 es mostra l'espectre de demanda enfrontat amb la bilineal de la capacitat. En aquest cas s'observa que el *performance point* de l'estructura individual es troba a la zona de desacceleració de la demanda, pel que l'estat de dany no s'espera molt elevat.

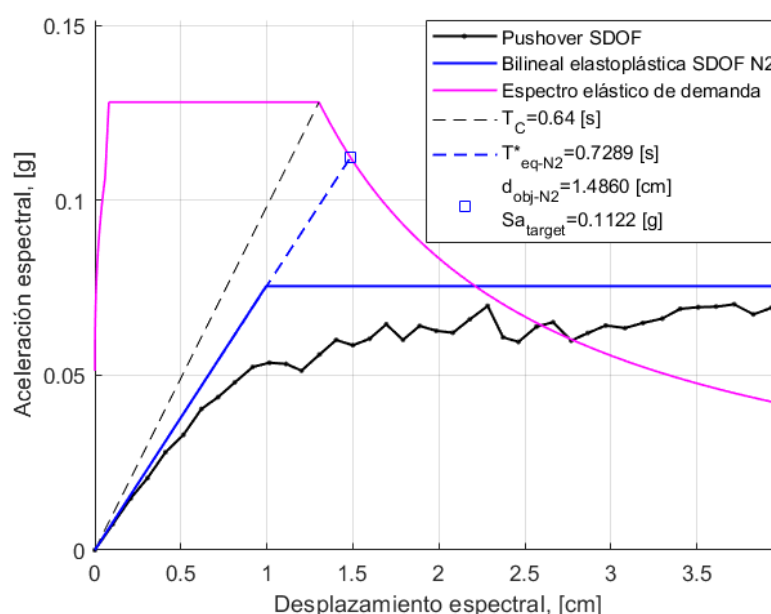


Figura 22. Espectre de capacitat enfront de la demanda per l'edifici individual en la direcció X positiva.

Els paràmetres que defineixen la representació bilineal equivalent a l'espectre de capacitat usada per trobar el PP es troben a la taula 7.

Model	Punt	Direcció X		Direcció Y	
		Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
E01	Du (m)	0,0499	0,0542	0,0340	0,0287
	Au (g)	0,0754	0,0782	0,1456	0,1542
	Dy (m)	0,0100	0,0105	0,0181	0,0197
	Ay (g)	0,0754	0,0782	0,1456	0,1542
AG01	Du (m)	0,0473	0,0495	0,0370	0,0286
	Au (g)	0,0830	0,0852	0,1413	0,1355
	Dy (m)	0,0096	0,0100	0,0189	0,0177
	Ay (g)	0,0830	0,0852	0,1413	0,1355

Taula 7. Paràmetres de la representació bilineal per cada model, direcció i sentit.

5.3. Corbes de fragilitat

Les corbes de fragilitat mostren la probabilitat d'excedència de cada estat de dany i s'han calculat aplicant el mètode RISK-UE proposat a l'Eurocodi 8 com s'ha explicat a l'apartat 3 de metodologia. A la figura 23 es poden observar les corbes de l'agregat per les direccions X i Y positives.

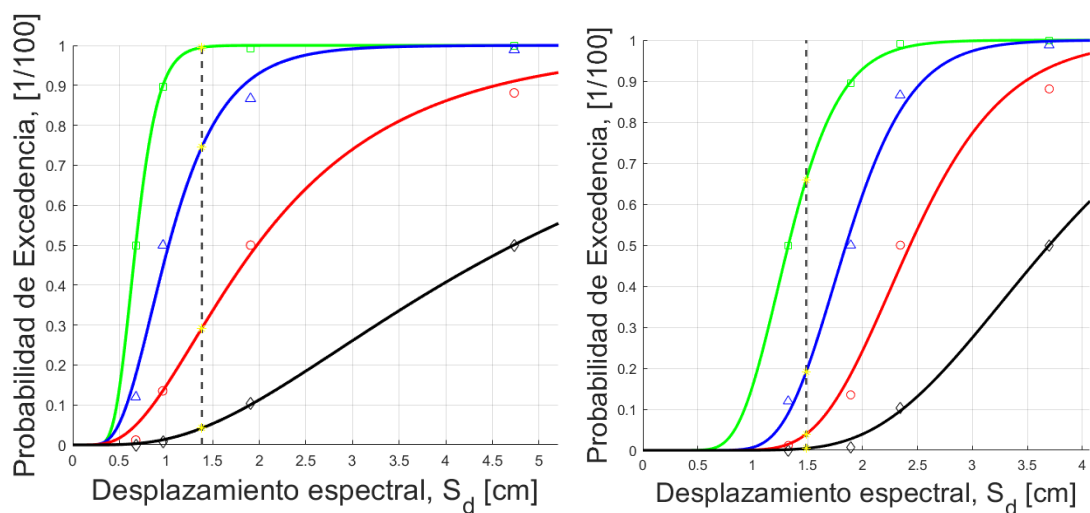


Figura 23. Corbes de fragilitat pel model agregat en les direccions X positiva (esquerra) i Y positiva (dreta).

5.4. Probabilitat estats de dany

Amb l'anàlisi fràgil també s'han calculat les probabilitats de succeïment de cada un dels 5 estats de dany definits al punt 3.2. La figura 24 mostra de manera molt visual els valors de probabilitat per cada estat de dany que es poden trobar a la taula 8.

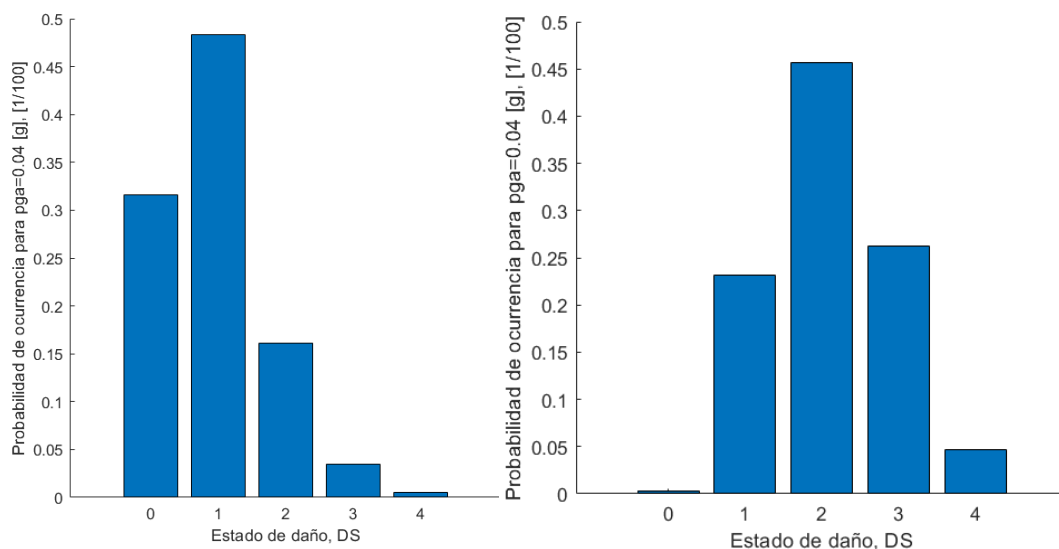


Figura 24. Probabilitat de cada estat de dany per model individual direccions Y (esquerra) i X (dreta) positives.

Direcció	X positiva					Y positiva				
Estat de dany	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Probabilitat, en %	0,35	23,11	45,67	26,23	4,65	31,6	48,35	16,13	3,44	0,48

Taula 8. Valors de les probabilitats de cada estat de dany DS pel model individual.

5.5. Índex de dany

La gràfica final obtinguda mostra l'índex de dany pel desplaçament espectral per a diferents PGA com el que es pot veure a la figura 25.

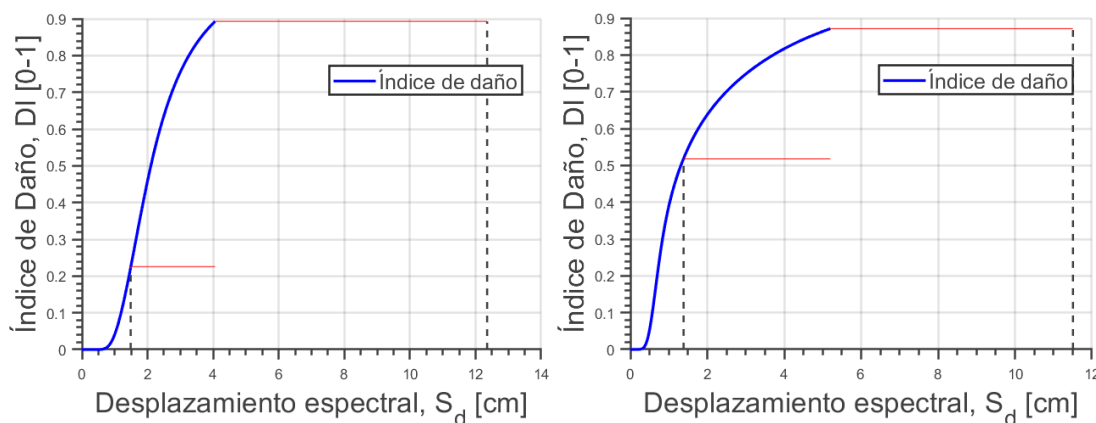


Figura 25. Índex de dany en funció del desplaçament espectral pel model agregat en les direccions Y (esquerra) i X (dreta) positives. Marcats en línies discontinües es mostren els valors de DI pels pga 0,04 i 0,194.

5.6. Comparativa model individual i agregat

Per últim, s'ha realitzat una comparativa de les corbes de capacitat dels models individual i agregat conjuntament. Això es mostrarà a través de 5 gràfiques i, com anteriorment en les direccions X i Y i sentits positiu i negatiu. La primera gràfica mostra la corba de capacitat pels dos models on es podrà comparar el tipus de comportament si l'edifici actua de manera més o menys dúctil i si la resistència és major o menor. La segona mostra la comparativa de les corbes de capacitat de les parets que s'han usat com a objecte d'estudi que són les laterals dreta i esquerra en ambdós casos i, exclusivament pel model agregat, la mitjanera que representa la separació entre ambdós edificis. Les parets laterals de l'edifici individual E01 s'han dibuixat de 30 cm, simulant que després de l'enderrocament els murs mitjaners es mantenen intactes per evitar qualsevol dany a l'edifici adjacent. Les gràfiques tercera i quarta mostren pel model E01 i AG01 respectivament, la diferència de contribució entre la corba *pushover* i les parets d'interès de cada model. Finalment es presentaran dues taules que contenen el percentatge de contribució dels nodes continguts a les parets de interès de cada model respecte el tallant total aplicat.

5.6.1. Corbes de capacitat

A la figura 26 es mostra la comparativa de la capacitat dels models individual, E01 i agregat, AG01. S'observa com el model individual té un comportament molt més dúctil però una resistència molt inferior.

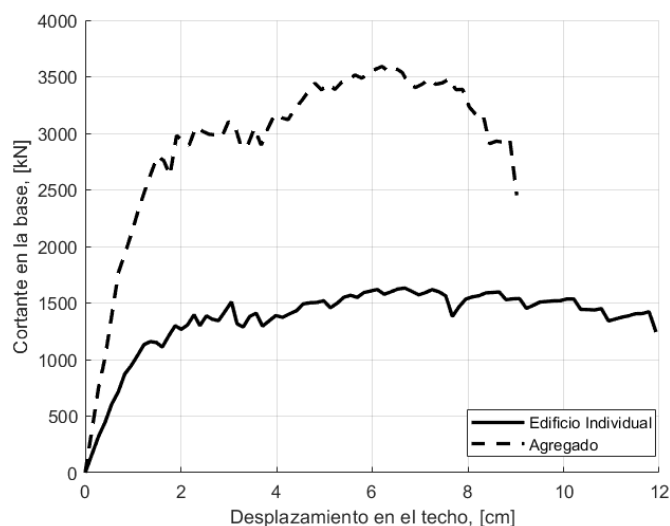


Figura 26. Corbes de capacitat pels models individual (línies contínues) i agregat (línies discontinues) per la direcció X positiva.

5.6.2. Corbes de capacitat de les parets d'interès

S'ha decidit estudiar les parets perimetrals més la mitjanera en el cas de l'agregat dels models estructurals i comparar els seus comportaments ja que són les principals fonts de sosteniment de l'edifici. A la figura 27 pot veure les seves conductes pels eixos X i Y. En l'eix X i tant per l'agregat com l'individual, les parets perimetrals tenen una evolució diferent ja que la demanda està aplicada directament sobre una d'elles, l'esquerra en el cas mostrat, i aquesta arriba reduïda a l'altra un cop travessa tota l'estructura. La mitjanera en canvi, rep una demanda molt més elevada i suporta un desplaçament inferior pel que tindrà un comportament més dúctil. En l'eix Y en canvi, la força és simètrica en ambdues parets pel que les corbes són pràcticament idèntiques. A més, el comportament de la paret mitjanera també és el mateix que el de les perimetrals però amb uns valors de tallant més elevats degut al seu major espessor.

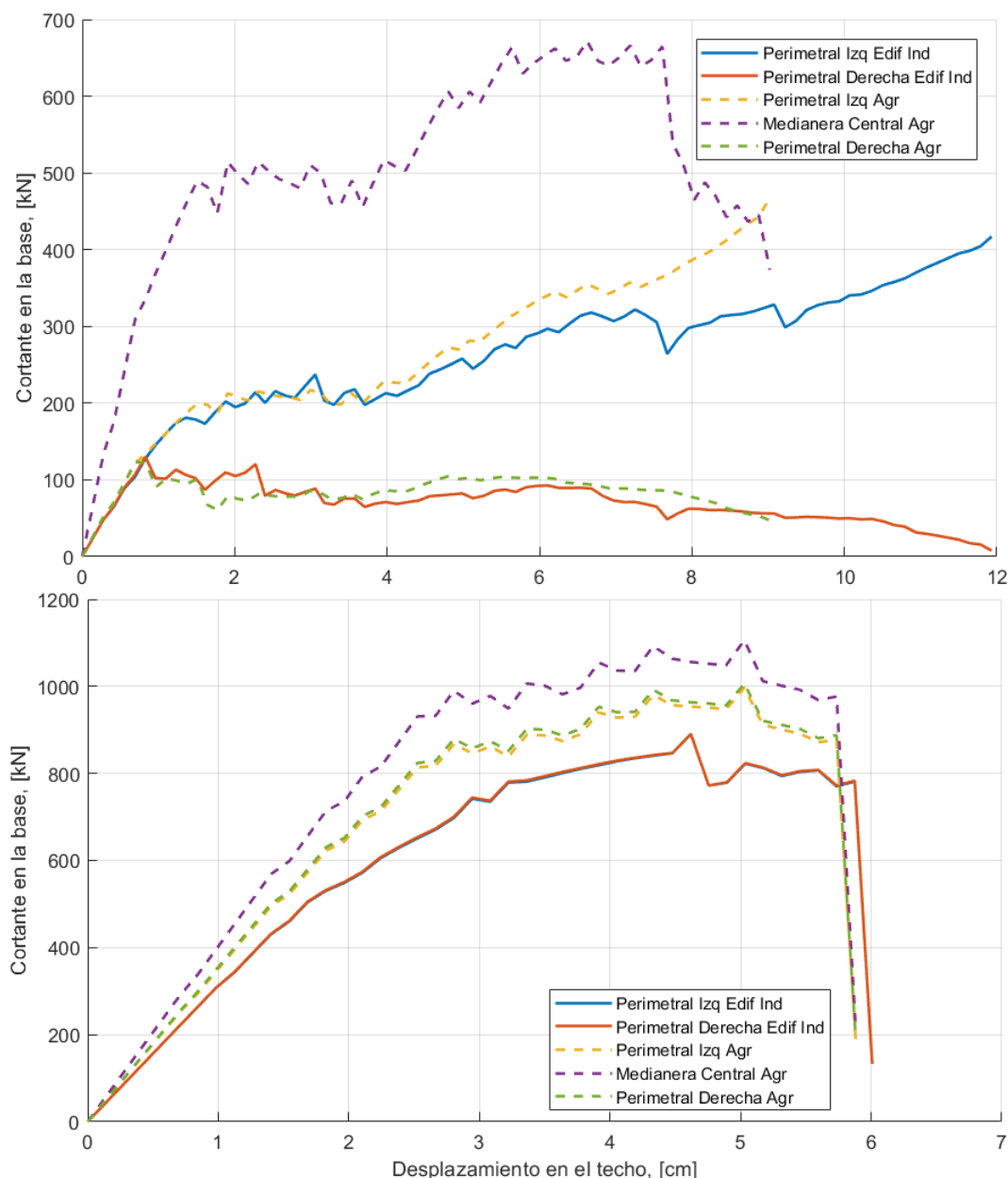


Figura 27. Corbes de capacitat de les capacitats d'interès. Es mostren les direccions X positiva (superior) i Y positiva (inferior).

5.6.3. Comparativa Pushover i parets d'interès

La figura 28 mostra la contribució de cada paret a la corba *pushover* total que és la obtinguda en l'eix X. En la direcció X a contribució de les parets de l'eix Y ja s'ha tingut en compte en la de l'eix X pel que no és una contribució real, però de totes maneres pot ser dibuixada mitjançant les parets perimetrals.

Pel que fa a l'eix Y la contribució és més rellevant perquè mostra millor el comportament verídic de l'estructura.

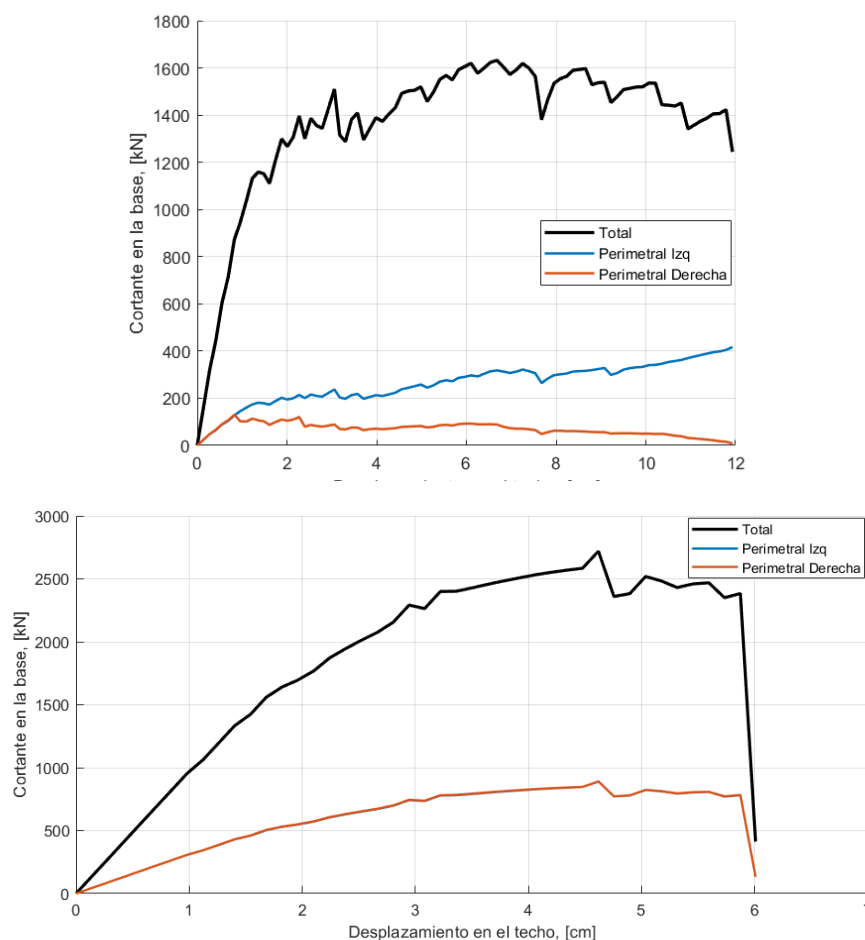


Figura 28. Corba pushover total i contribucions de les parets perimetral per l'eix X (superior) i Y (inferior).

La contribució percentual de les principals parets d'interès es troba a la taula 9 pel model individual i a la 10 per l'agregat.

Direcció	X		Y	
Sentit	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
Perimetral esquerra	18,9	5,8	32,5	32,5
Perimetral dreta	5,6	18,8	32,5	32,5

Taula 9. Contribució a la corba pushover total de les principals parets d'interès pel model individual.

Direcció	X		Y	
Sentit	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
Perimetral esquerra	8,8	3,2	18,4	18
Mitjanera	17,1	17,0	20,9	20,9
Perimetral dreta	3,1	8,6	18,7	18,6

Taula 10. Contribució a la corba pushover total de les principals parets d'interès pel model agregat.

6. Discussió i conclusions

Aquest treball es basa en l'estudi d'un edifici de l'Eixample barceloní. L'edifici triat s'ha escollit com a model per la representativitat que suposa al tenir més de 100 anys de vida i al estar construït amb maçoneria no-reforçada, trets comuns del districte com s'ha comentat a l'apartat 2. És necessari i important l'estudi d'aquest tipus d'edificis ja que en l'època de construcció no es tenien en consideració les accions sísmiques i, a més, els materials tenen variacions de les propietats molt elevades degut a la falta de tècnica i l'ús d'eines rudimentàries de l'època, fet que pot afectar molt al comportament de l'estructura ja que no es garanteix una uniformitat estructural.

L'estudi de la normativa de construcció sismoresistent ensenya que és important la bona selecció de la demanda aplicada ja que, com s'ha comentat a l'apartat 3, aquesta pot variar en efectes i conseqüències segons el tipus de terreny i la zona geogràfica on l'edifici es troba construït.

En l'anàlisi estàtic s'ha corroborat que els tres primer modes de vibració són els que desplacen més massa en ambdues direccions de l'anàlisi i el fet que el primer mode sigui el més important en diferència, mou més del 70% de la massa total, tant en la direcció X com la Y justifica el fet d'haver triat el mètode N2 ja que aquest considera com a mode més important el primer.

Pel que fa a les corbes de capacitat en ambdues direccions els dos models, tant l'agregat com l'individual, tenen un comportament típic de material ceràmic, és a dir, una primera zona de ràpid creixement de tallant amb poca deformació seguit d'una zona plàstica més irregular però amb menor diferència de valors. La diferència principal trobada és que, a l'aplicar la demanda en l'eix X, la construcció té un comportament més dúctil ja que té un desplaçament últim més elevat. En aplicar-la a l'eix Y en canvi, el tallant màxim és més elevat i la deformació és menor, pel que el model és més fràgil.

En quant als estats de dany s'observa que en la direcció Y les probabilitats de que el dany sigui alt són menors que en l'eix X. Per l'eix X la probabilitat més alta és la de dany lleuger, corresponent a l'estat de dany 1 i per l'eix Y de dany moderat, corresponent a l'estat de dany 2. Aquest fet va relacionat amb que els valors de ductilitat en la direcció X són molt superiors als de l'eix Y com s'observa a les taules 11 i 12. Així doncs, la demanda provoca un comportament més dúctil a l'edifici si està aplicada en la direcció de les parets laterals (direcció X). Si, en canvi, s'aplica en la direcció de les frontal i posterior (direcció Y), el comportament és més fràgil.

Direcció	X		Y	
Sentit	Positiu	Negatiu	Positiu	Negatiu
Du (cm)	4,73	4,95	3,7	2,86
Dy (cm)	0,96	1	1,89	1,77
Ductilitat (Du/Dy)	4,927	4,950	1,958	1,616

Taula 11. Valors de desplaçament últim Du, desplaçament de fluència Dy i de ductilitat pel model agregat.

Direcció	X		Y	
Sentit	Positiu	Negatiu	Positiu	Negatiu
Du (cm)	4,98	5,42	3,40	2,87
Dy (cm)	1,00	1,05	1,81	1,97
Ductilitat (Du/Dy)	4,98	5,16	1,88	1,46

Taula 12. Valors de desplaçament últim Du, desplaçament de fluència Dy i de ductilitat pel model individual.

Model	E01				AG01			
Direcció	X		Y		X		Y	
Sentit	Positiu	Negatiu	Positiu	Negatiu	Positiu	Negatiu	Positiu	Negatiu
DI (tant per un)	0,5305	0,5139	0,2346	0,1505	0,5175	0,5103	0,2256	0,2617
DI (%)	53,05	51,39	23,46	15,05	51,75	51,03	22,56	26,17

Taula 13. Valors de l'índex de dany (DI) per totes les direccions i sentits i per ambdós models d'estudi en tant per cent i en tant per un.

A la taula 13 es mostren els resultats obtinguts per l'índex de dany. Es pot observar que la quantitat de dany patida en ambdues direccions d'aplicació és molt elevada però sobretot en la de l'eix X on aquest sobrepassa el 50% en tots els casos. Així doncs, el valor del DI indica una altra vulnerabilitat dels edificis tant de manera agregada com individual. De la comparativa entre models dels valors d'índex de dany es dedueix que, malgrat que aquests són molt similars, les principals diferències les observem en els valors de tallant i desplaçament al sostre que assoleixen cada un. Com s'ha mostrat, el model agregat presenta uns valors superiors de tallant però inferiors de desplaçament al sostre respecte a aquells observats a l'edifici individual. Això últim és conseqüència directa de la participació d'un major nombre d'elements dins del sistema agregat, així com de la major esveltesa en planta del conjunt.

Malgrat que no és objectiu d'aquest treball comparar els valors d'acceleració del terreny proposats per la normativa espanyola i els estudis de micro-zonació, aquests últims s'han de tenir en compte ja que donen una major qualitat en les dades d'entrada i com a conseqüència, els resultats obtinguts. A més, el valor del PGA escollit afecta considerablement i de manera directa els valors de desplaçament espectral del punt de funcionament i, per tant, la tendència dels estats de dany pot dirigir-se a majors o menors valors segons el cas.

De l'anàlisi comparatiu es pot extreure que, pel model individual, el fet d'aplicar la demanda en un sentit o altre de la direcció X implica que la paret d'aplicació directa rebi molta més demanda que l'altra ja que a la segona la força es distribueix per l'efecte de les parets interiors de l'edifici. En canvi, si la

demanda segueix la direcció Y les parets perimetrals reben el mateix esforç tallant. Aquests comportaments es repeteixen pel model agregat en les parets mitjaneres però amb l'afegit de la paret mitjanera que és la que contribueix més a la corba de capacitat.

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

Aquest treball no genera impacte ambiental molt important, tot i això, a la taula 10 es mostren els valors de consum aproximats que ha ocasionat. Les dades de consum del portàtil es una mitjana estreta de (34) i la del transport de (35).

	Consum	Unitats	Quantitat	Unitats	Total (kW)
Portàtil	4	(kWh)	400	h	1600,00
Transport	9,28	(kW/l)	2,304	l	21,38
				TOTAL	1621,38

Taula 14. Taula d'impacte ambiental fruit de la realització del treball.

8. Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

A la taula 11 es mostra l'anàlisi de pressupost que ha comportat la realització del present document.

Descripció	Quantitat	Unitats	Preu	Unitats	Total
Hores enginyer junior	400	Hores	15,00	€/hora	6000
Llicència Matlab	-		-		<i>Atorgada a través de la matriculació</i>
Matriculació UPC	1	matrícula	1039,38	€/matrícula	1039,38
Llicència Tremuri	-		-		<i>Atorgada a través de la matriculació</i>
				TOTAL	7039,38 €

Taula 15. Taula amb el pressupost necessari per la realització del treball.

Bibliografia

1. Irizarry, J. *An advanced approach to seismic risk assessment. Application to the cultural heritage and the urban system of Barcelona. Dissertation.* Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
2. Cid, J. et al. Zonacion sismica de la ciudad de Barcelona. A: *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. 1999, núm. 1, p. 263-271.
3. Milutinovic, Z. V. i Trendafiloski, G.S. WP4:Vulnerability of current buildings. Risk-UE project Handbook. A: *European Comission*. 2003, DOI 10.1007/978-1-4020-3608-8_23.
4. Lantada, N., Pujades, L.G. i Barbat, A.H. Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. A: *Natural Hazards*. 2009, Vol. 51, núm. 3, p. 501-524. ISSN 0921030X. DOI 10.1007/s11069-007-9212-4.
5. Javier Muñoz Alvarez. La modernidad de Cerdà: más allá del “ensanche” algunos apuntes de ingeniería y cultura. A: . 2009, p. 225. DOI M-50111-2009.
6. Cerdà, I. *Teoría General de la Urbanización y aplicación de sus principios y doctrinas a la Reforma y Ensanche de Barcelona* [en línia]. Madrid: 1867. Disponible a: <http://www.anycerda.org/web/es/arxiu-cerda/fitxa/teoria-general-de-la-urbanizacion/115>.
7. Àngel Frigola, J. El Call de Barcelona. A: [en línia]. 2015. Disponible a: <https://sortidesambgracia.com/2015/03/17/el-call-de-barcelona/>.
8. Camp d'Aprenentatge de Barcelona. El Pla Cerdà. A: . 2008,
9. Monlau, P.F. *Abajo las murallas!!!: memoria de las ventajas que reportaria Barcelona, y especialmente su industria, de la demolición de las murallas que circuyen la ciudad* [en línia]. Barcelona: Imp. del Constitucional, 1841. Disponible a: <http://mdc.csuc.cat/cdm/ref/collection/fulletsAB/id/16475>.
10. Dalmau Salvia, J. Los planes de Barcelona (1): El Plà Cerdà y la realidad del Ensanche. A: , 2C: *Construcción de la ciudad* [en línia]. 1972, Vol. 0, p. 24-38. Disponible a: <http://hdl.handle.net/2099/4973>.
11. Institut Cerdà. Ildefons Cerdà, el urbanista. A: [en línia]. Disponible a: <https://www.icerda.org/es/ildefons-cerda/p/3>.
12. Permanyer, Ll. Cerdà, un visionari maleït. A: [en línia]. Espanya: Televisió de Catalunya, 2009. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=6wdDwWyTTDA&t=2014s>.
13. Ajuntament de Barcelona. Web commemorativa del 150è aniversari del pla Cerdà. A: [en línia]. 2009. Disponible a: www.anycerda.org.
14. Universitat de Girona. Exemple de com pretenia ser el pla Cerdà en un inici. A: [en línia]. 2009, Disponible a: <http://www.anycerda.org/web/es/activitats/debat-i-reflexio/Inauguracio-del-cicle-Cerda-enginyer-arquitecte-de-la-ciutat->.

15. Ajuntament de Barcelona. *Pla Cerdà 1859* [en línia]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=d3hYkNBYIcl>.
16. Ajuntament de Barcelona. Departament d'Estadística. Dades de població de l'Eixample. A: [en línia]. 2018. Disponible a: <http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/guiadt02/pob02/index.htm>.
17. Pujades, L.G. et al. Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain). A: *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2012, Vol. 10, núm. 1, p. 331-349. ISSN 15731456. DOI 10.1007/s10518-010-9207-5.
18. Boluddha. *Arxiu fotogràfic boluddha a Instagram* [en línia]. 2018. Barcelona: 2018. Disponible a: <https://www.instagram.com/p/BoqvlRegKQR/>.
19. Moreno González, R. *Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona* [en línia]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2007. ISBN 9788469333921. [Consulta: 20 desembre 2018]. Disponible a: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6247>.
20. Applied Technology Council. *ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. 1996.
21. Lagaros, N.D. i Fragiadakis, M. Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings. A: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* [en línia]. Elsevier, 2011, Vol. 31, núm. 1, p. 77-90. ISSN 02677261. DOI 10.1016/j.soildyn.2010.08.007. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.007>.
22. Fajfar, P. i Gaspersic, P. The N2 method for the seismic damage analysis of rc buildings. A: . 1996,
23. EC8. *Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004:E*. 2004. 2004.
24. FEMA/NIBS. *HAZUS technical manual -SR2, vol 1,2,3*. 2002. Washington D.C.: 2002.
25. Grünthal, G. *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* 15. 1998. ISBN 2879770084. DOI 10.1111/j.1741-6787.2009.00173.x.
26. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02). A: . 2009.
27. Barbat, A.H. i Pujades, L.G. Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona. *Soil Dyn Earthq Eng* 28(10–11). A: . 2008, p. 851-865.
28. Avila-Haro, J.A. et al. Probabilistic seismic damage assessment of rc buildings based on nonlinear dynamic analysis. A: *16th World Conference on Earthquake Engineering* [en línia]. 2017, p. 1-13. ISSN 18741495. DOI 10.4067/S0716-10182012000100020 [doi]. Disponible a: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84935879495&partnerID=tZOtx3y1>.
29. Bonett Díaz, R.L. et al. *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta i moderada* [en línia]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2003. ISBN 8468850861. [Consulta: 20 desembre 2018]. Disponible a: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6230>.

30. Google Earth. A: [en línia]. 2018. Disponible a: <https://earth.google.com/web/>.
31. Avila Haro, J. *Arxiu fotogràfic*. 2018. 2018.
32. Lagomarsino, S. et al. *TREMURI: Seismic analysis program for 3DMasonry buildings (User guide) Technical report*. 2008. Genoa: S.T.A. DATA,2008.
33. Mathworks. *Matlab R2017b*. 2017. Mathworks,2017.
34. Etiqueta energètica. Cuánto consume un ordenador. A: [en línia]. 2019. Disponible a: <https://www.etiquetaenergetica.com/cuanto-consume-ordenador/>.
35. Ecorurbano. Calculadora energètica. A: [en línia]. Disponible a: http://www.ecourbano.es/calculadora_energetica.asp?accio=calcular.

Annex A

Aquest annex mostra les gràfiques obtingudes seguin el mètode proposat a l'apartat 3. Es mostren agrupades segons model i direcció i sentit.

A.1. Model individual, E01

Corbes de capacitat

Sentit X negatiu

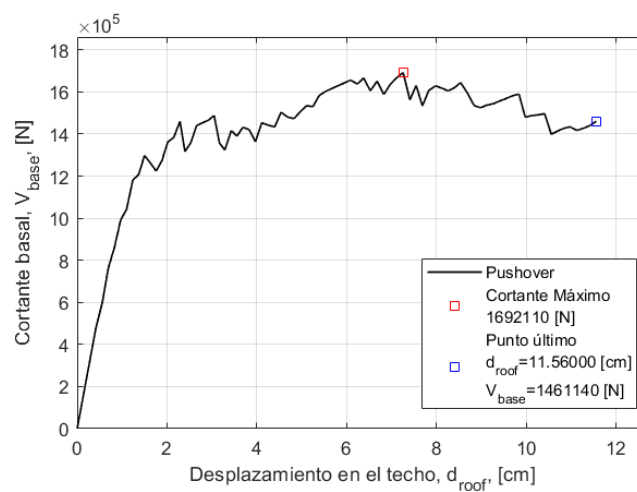


Figura 29. Corba de capacitat sistema MDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01.

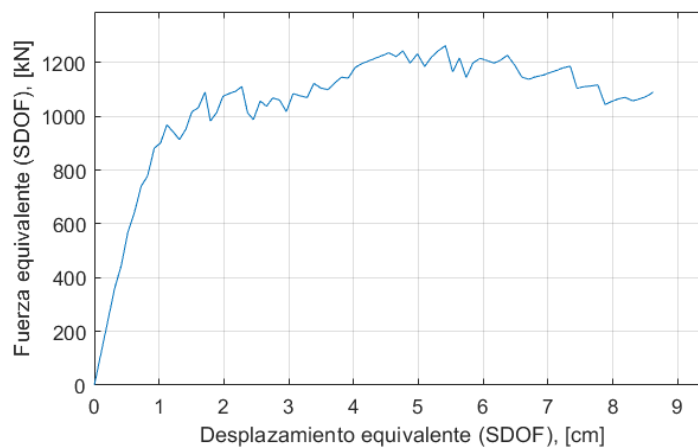


Figura 30. Corba de capacitat sistema SDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01.

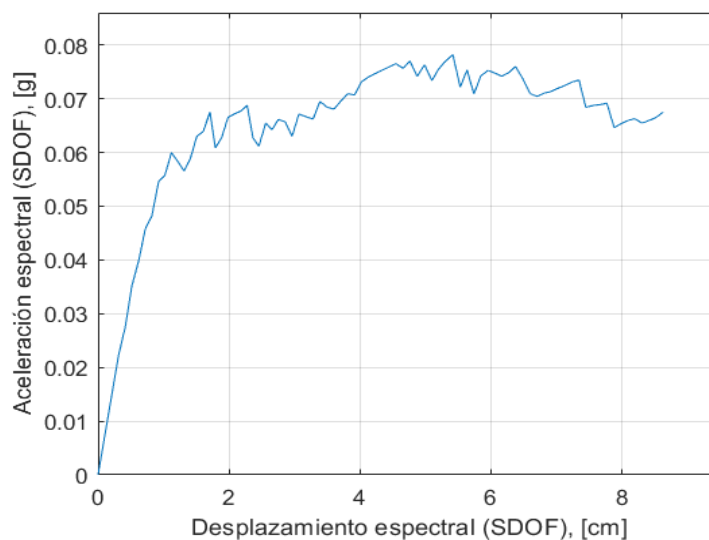


Figura 31. Espectre de capacitat sistema SDOF model individual sentit X negatiu pel model individual, E01.

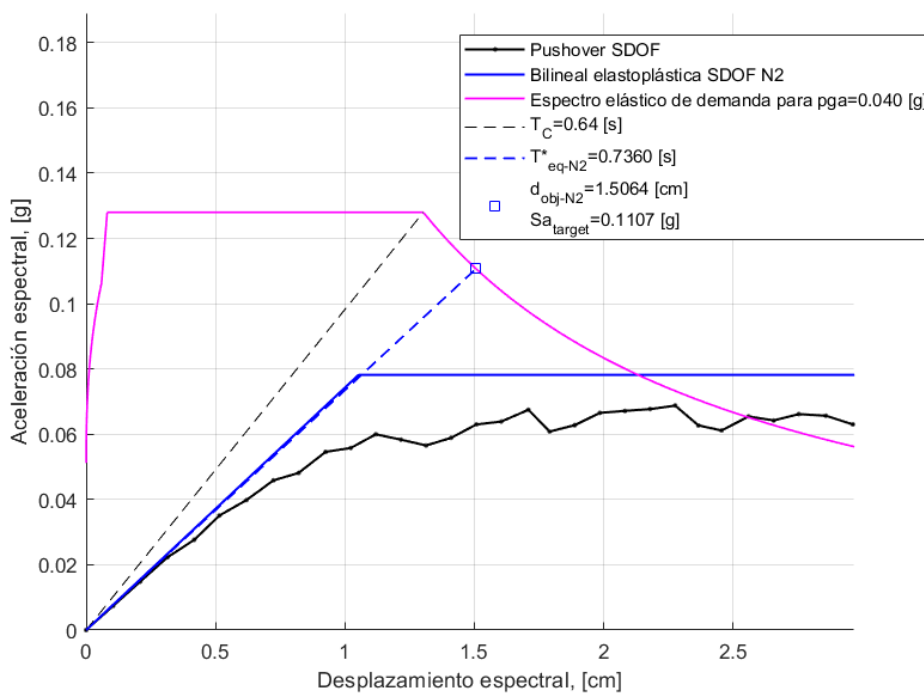


Figura 32. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel sentit X negatiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit X positiu

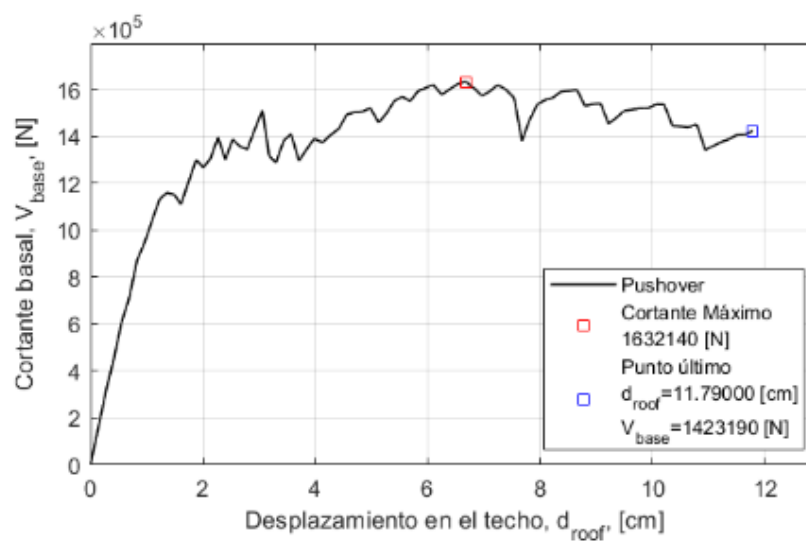


Figura 33. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X positiu pel model individual, E01.

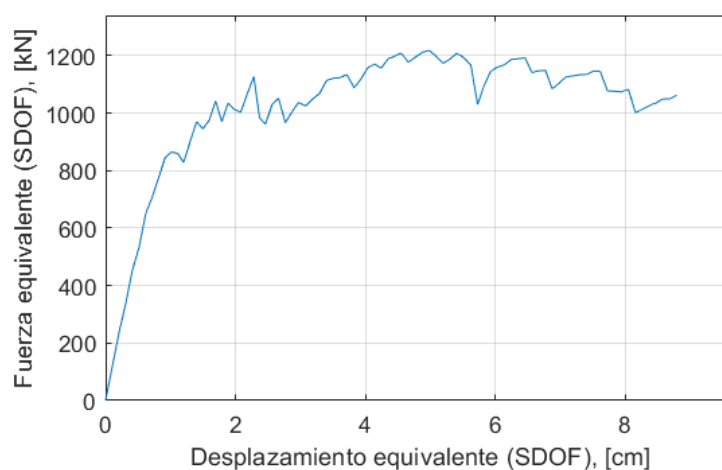


Figura 34. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model individual, E01.

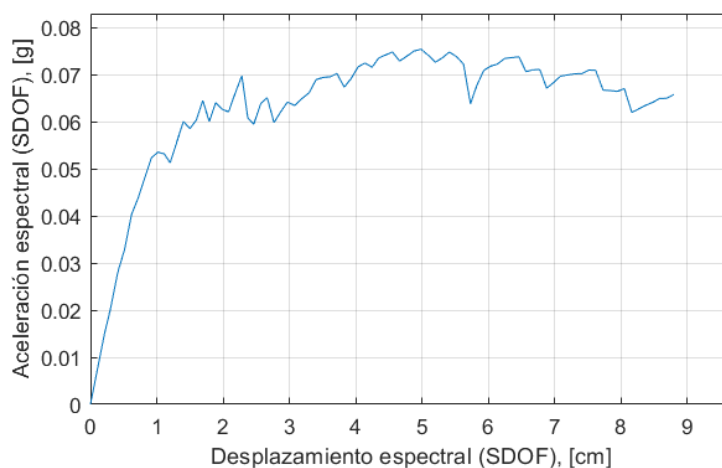


Figura 35. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model individual, E01.

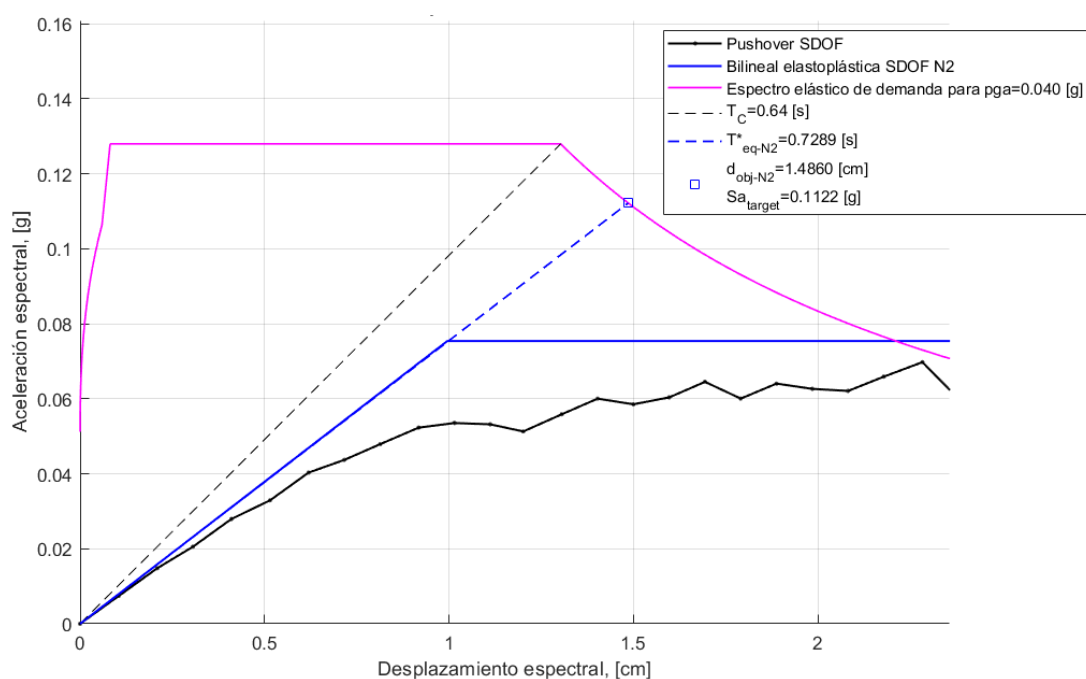


Figura 36. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit X positiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit Y negatiu

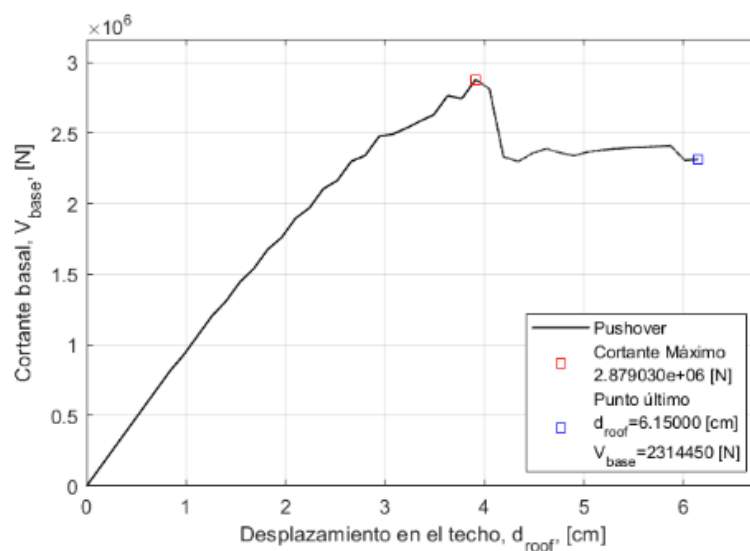


Figura 37. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01.

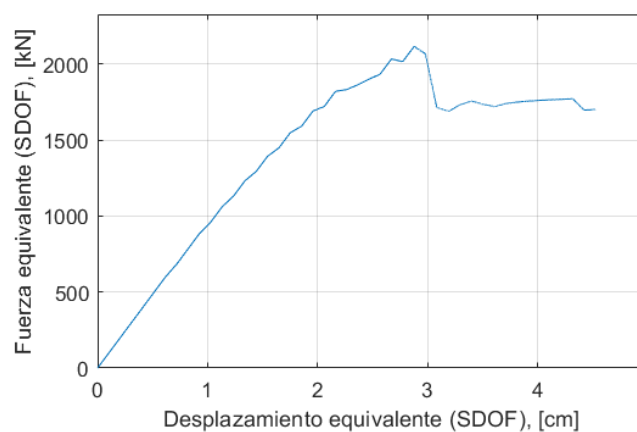


Figura 38. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01.

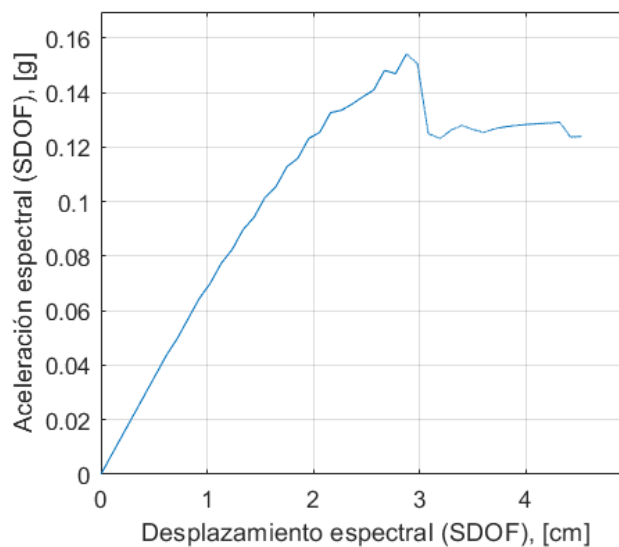


Figura 39. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model individual, E01.

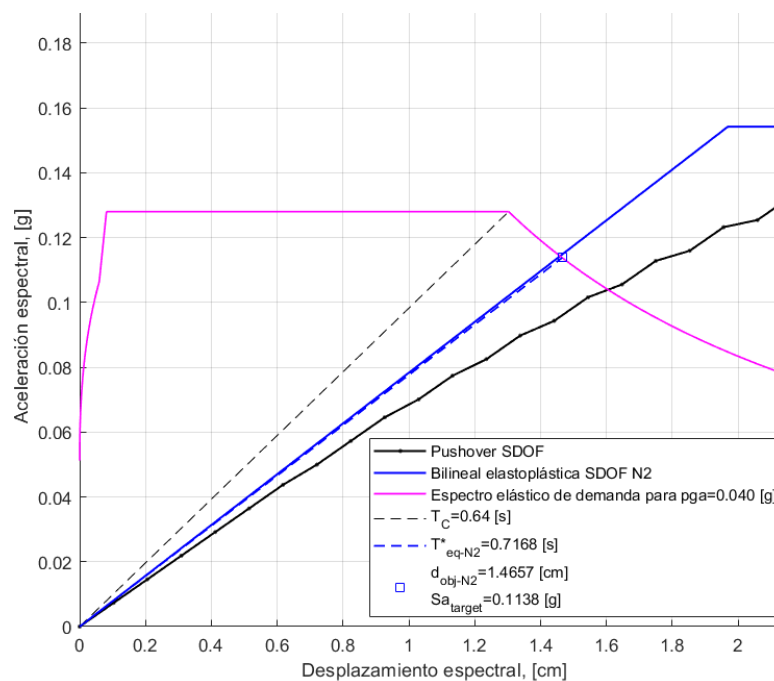


Figura 40. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit Y negatiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit Y positiu

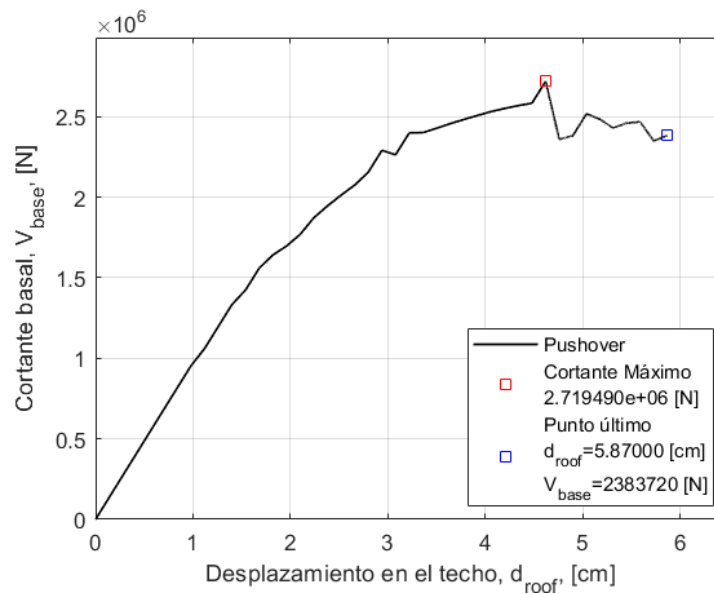


Figura 41. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01.

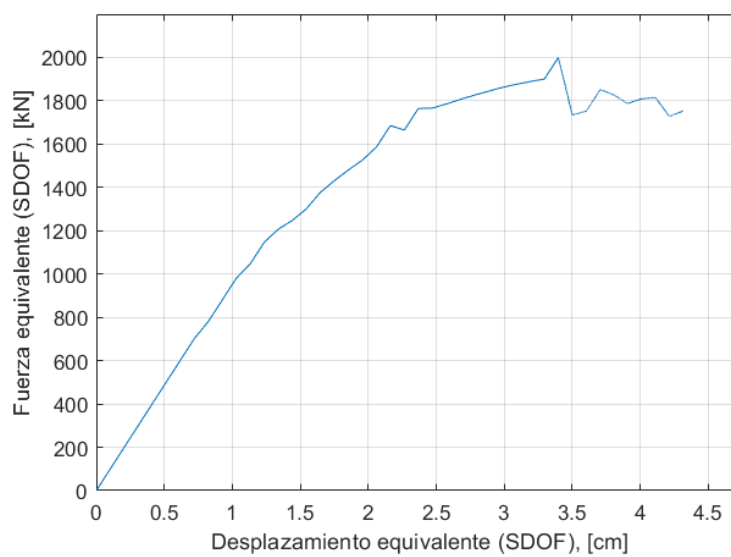


Figura 42. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01.

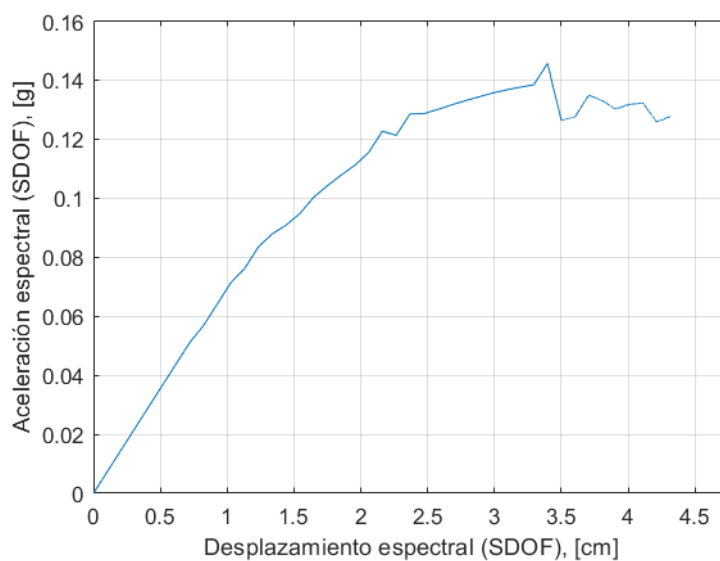


Figura 43. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model individual, E01.

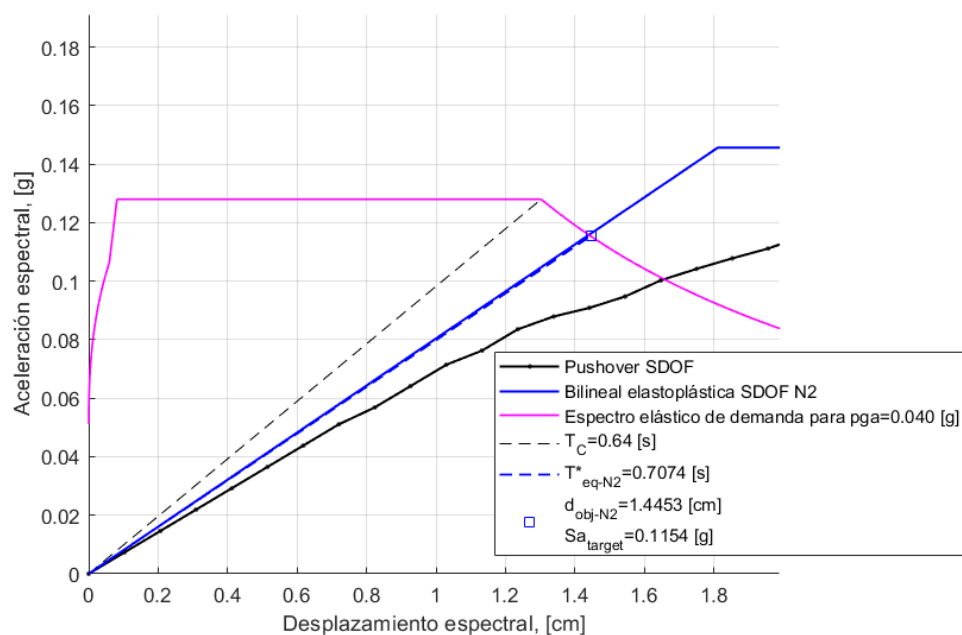


Figura 44. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat en sentit Y positiu pel model individual, E01. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Corbes de fragilitat

Sentit X negatiu

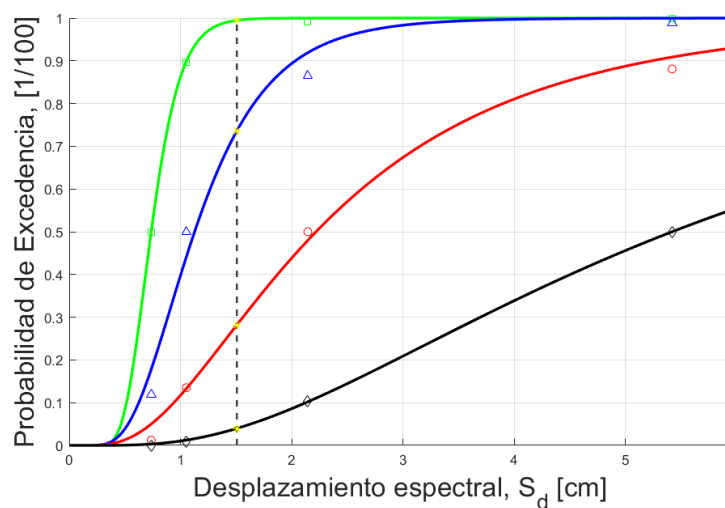


Figura 45. Corba de fragilitat pel model individual direcció X sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit X positiu

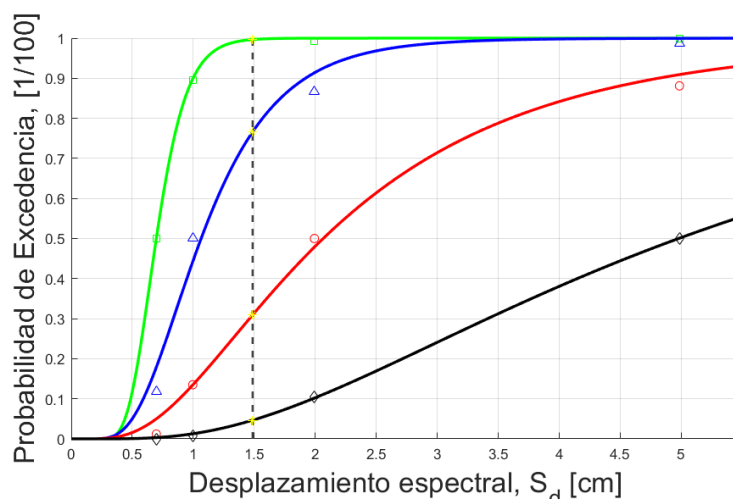


Figura 46. Corba de fragilitat pel model individual direcció X sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit Y negatiu

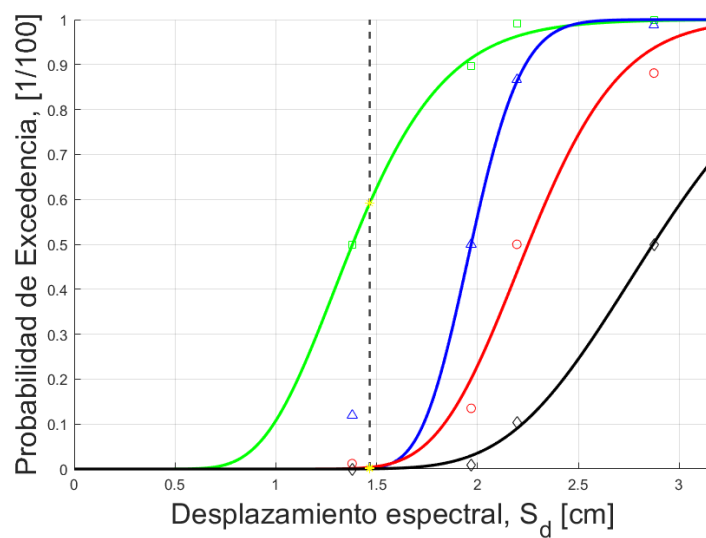


Figura 47. Corba de fragilitat pel model individual direcció Y sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit Y positiu

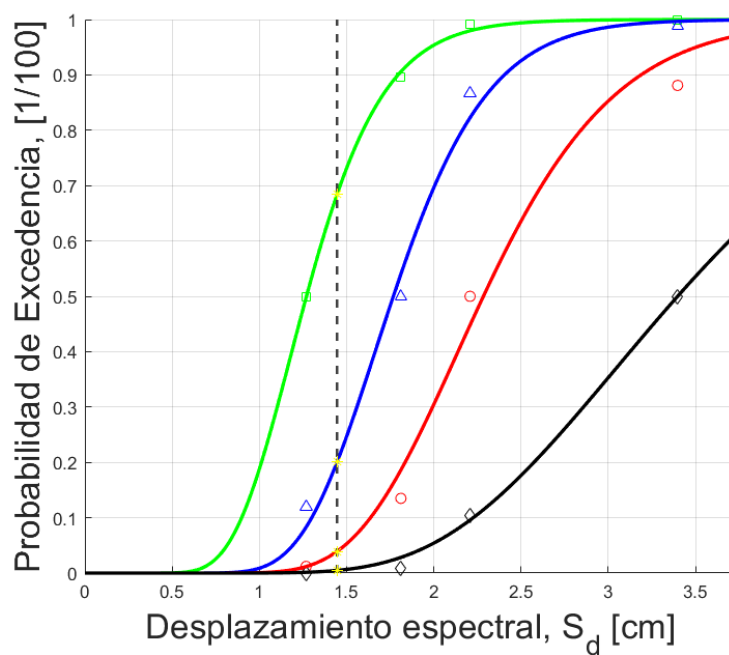


Figura 48. Corba de fragilitat pel model individual direcció Y sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Probabilitat estats de dany

Sentit X negatiu

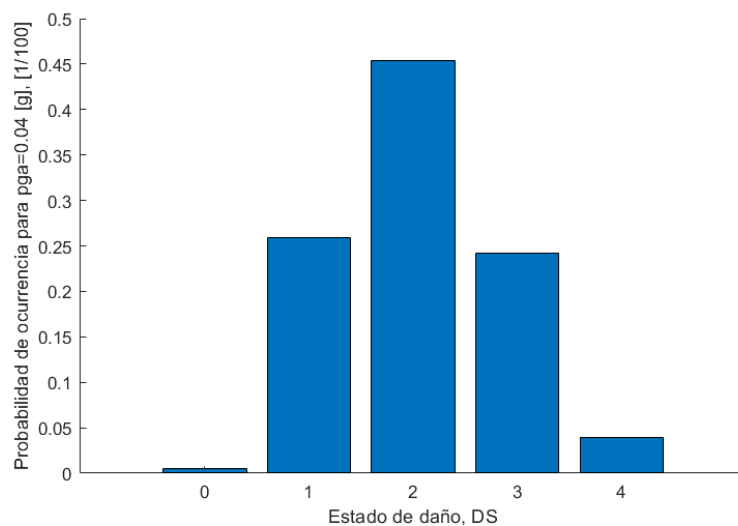


Figura 49. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció X negativa.

Sentit X positiu

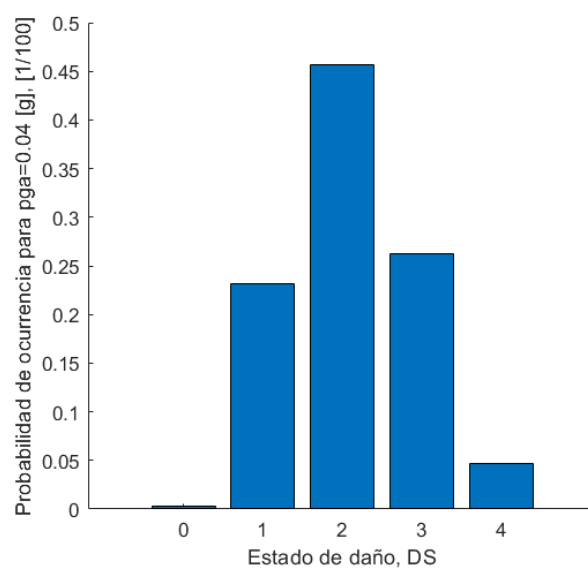


Figura 50. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció X positiva.

Sentit Y negatiu

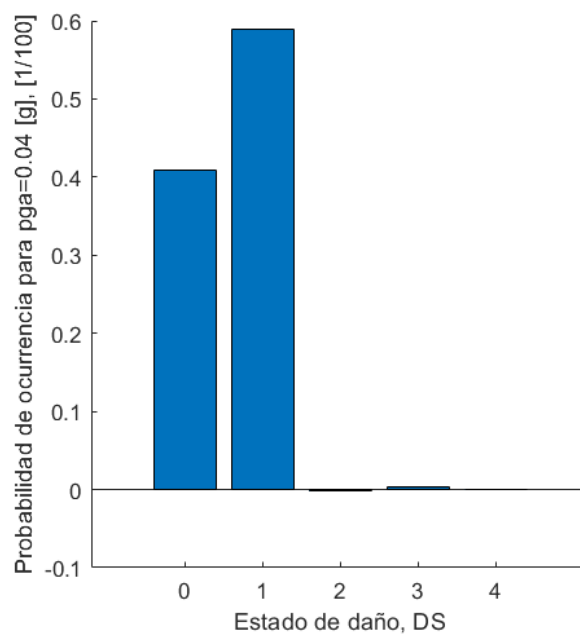


Figura 51. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció Y negativa.

Sentit Y positiu

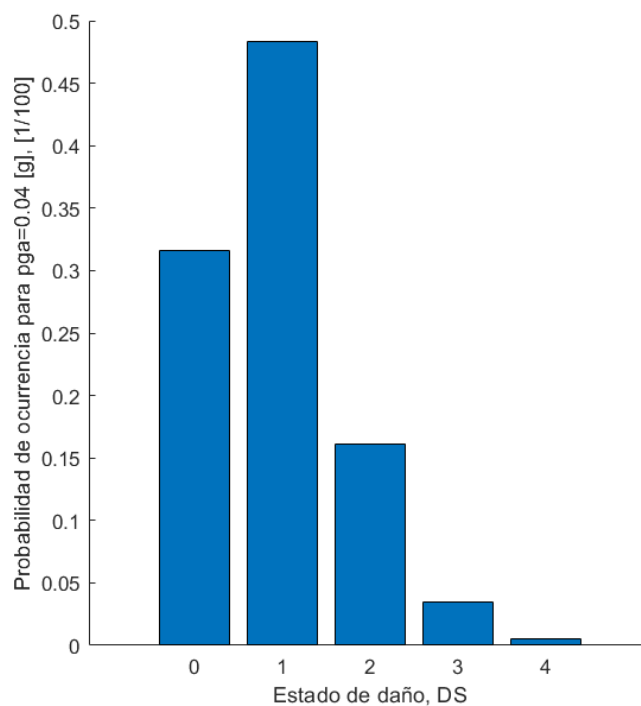


Figura 52. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model individual direcció Y positiva.

Índex de dany per cada desplaçament espectral

Sentit X negatiu

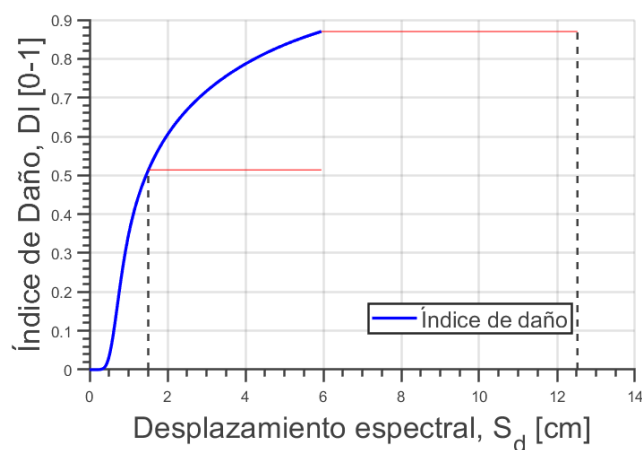


Figura 53. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_g a = 0.04$ i $p_g a = 0.194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció X negativa.

Sentit X positiu

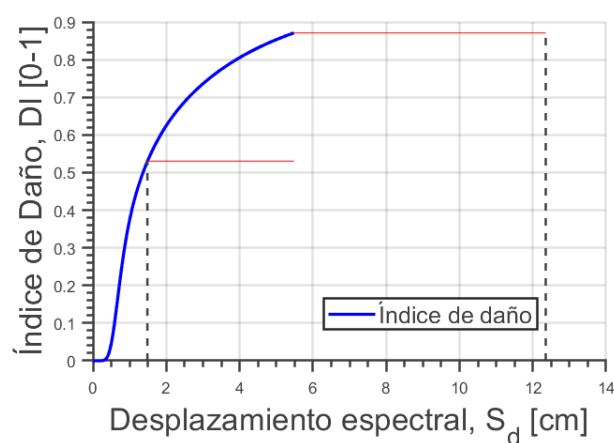


Figura 54. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_g a = 0.04$ i $p_g a = 0.194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció X positiva.

Sentit Y negatiu

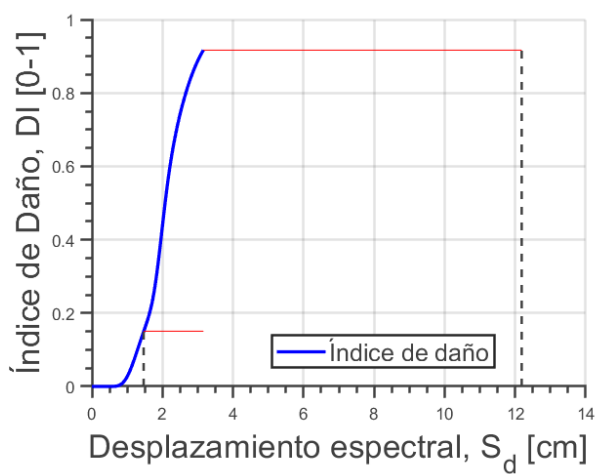


Figura 55. Gràfica de l'índice de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció Y negativa.

Sentit Y positiu



Figura 56. Gràfica de l'índice de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model individual E01 i a la direcció Y positiva.

A.2. Model agregat, AG01

Corbes de capacitat

Sentit X negatiu

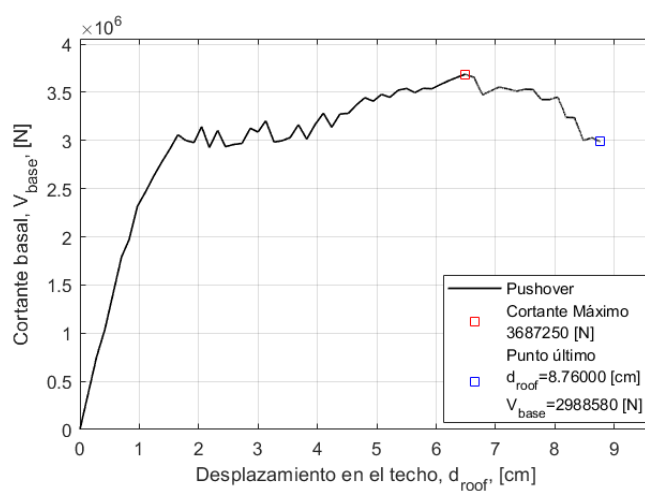


Figura 57. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01.

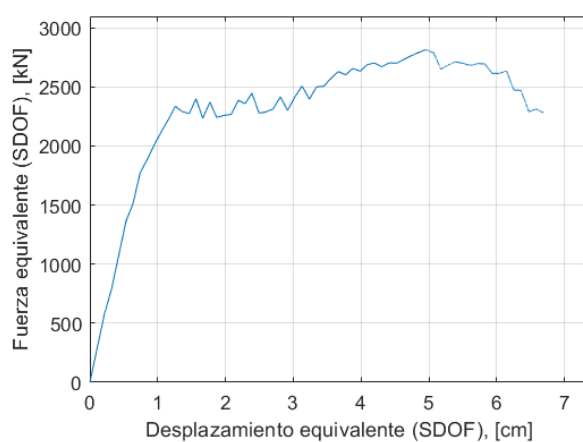


Figura 58. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01.

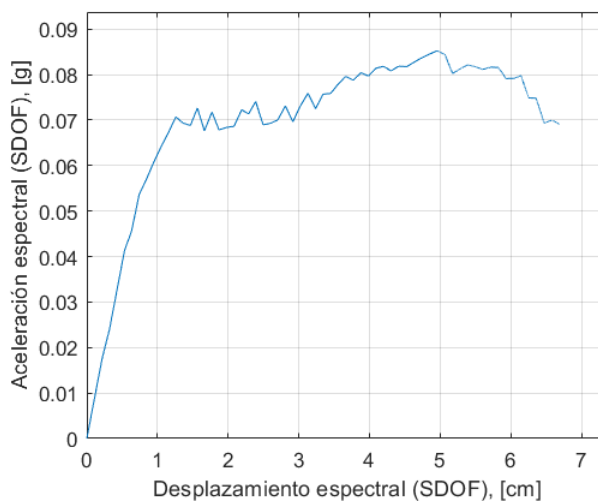


Figura 59. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X negatiu pel model agregat, AG01.

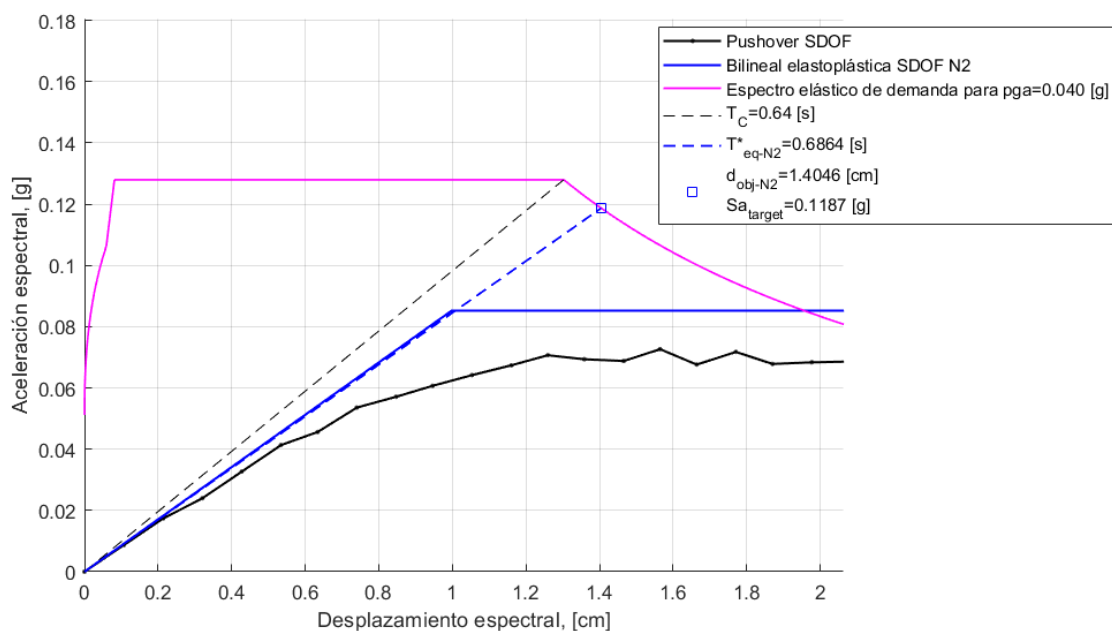


Figura 60. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit X negatiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit X positiu

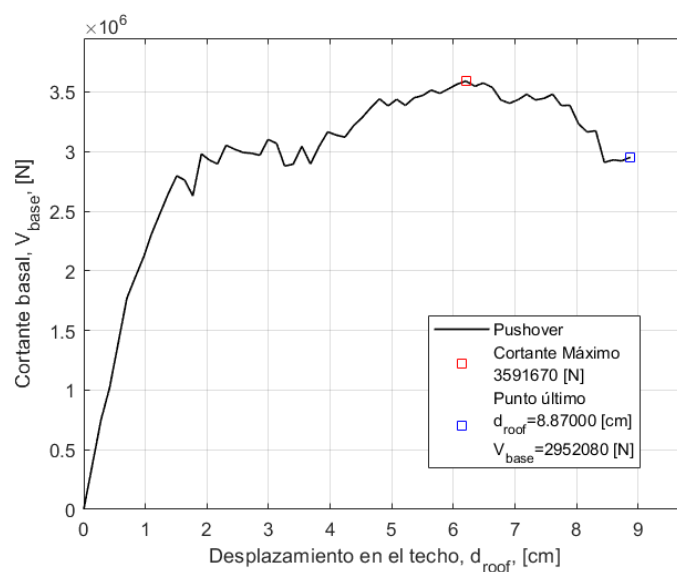


Figura 61. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01.

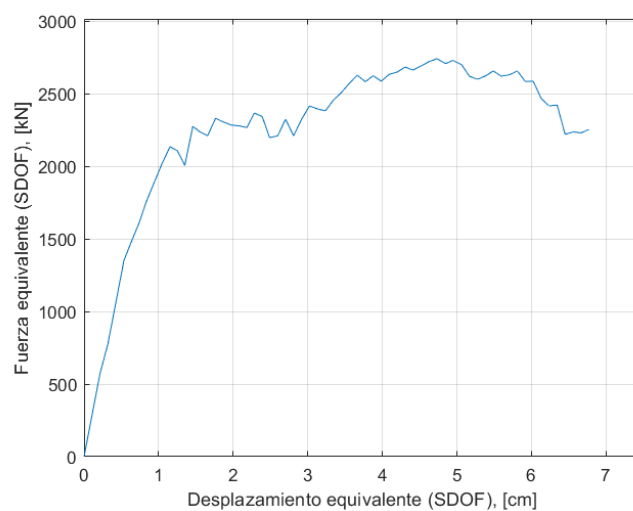


Figura 62. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01.

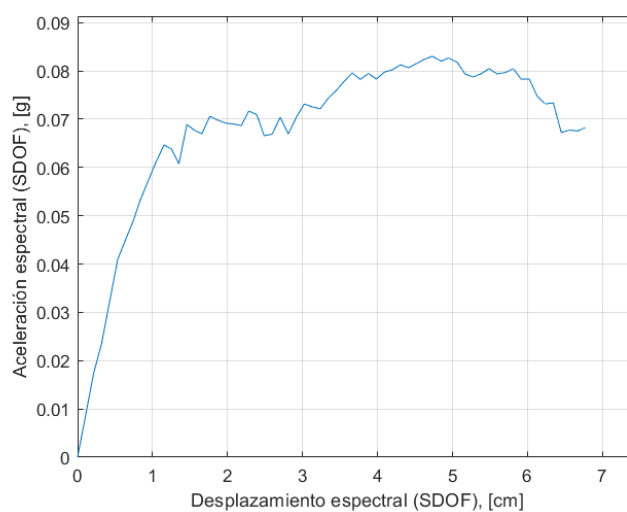


Figura 63. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit X positiu pel model agregat, AG01.

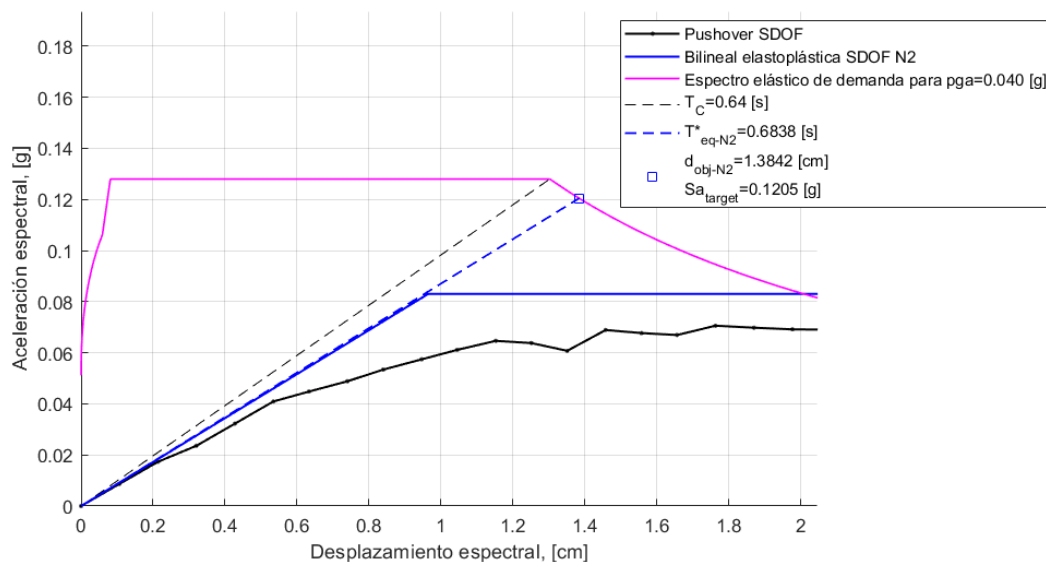


Figura 64. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit X positiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit Y negatiu

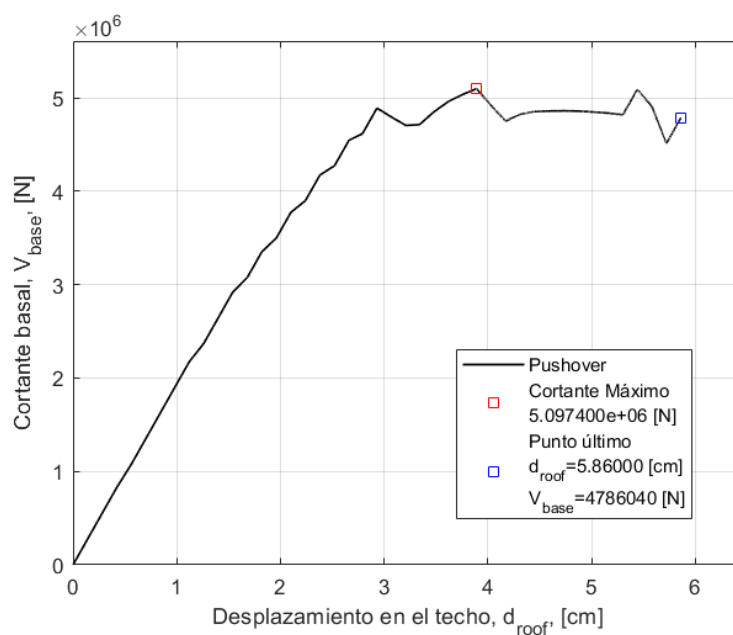


Figura 65. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01.

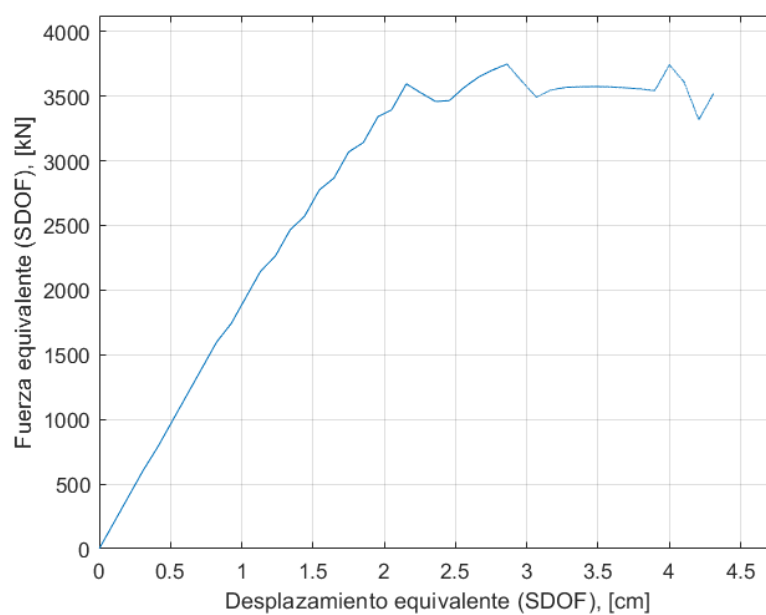


Figura 66. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01.

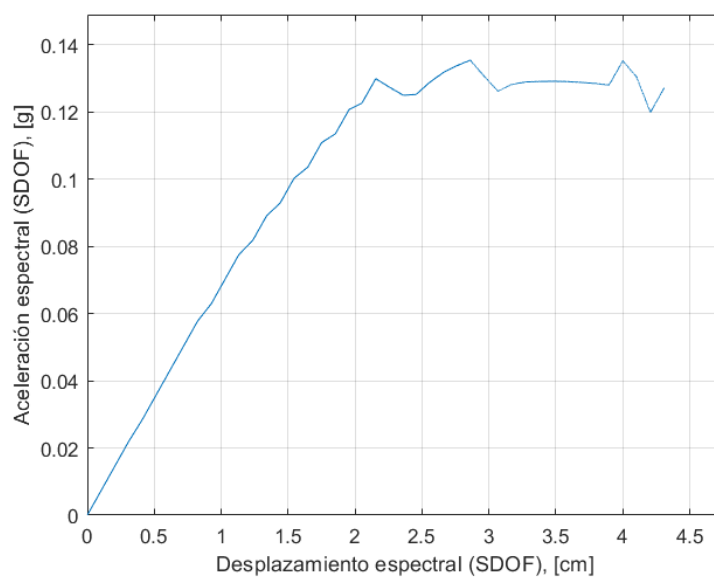


Figura 67. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y negatiu pel model agregat, AG01.

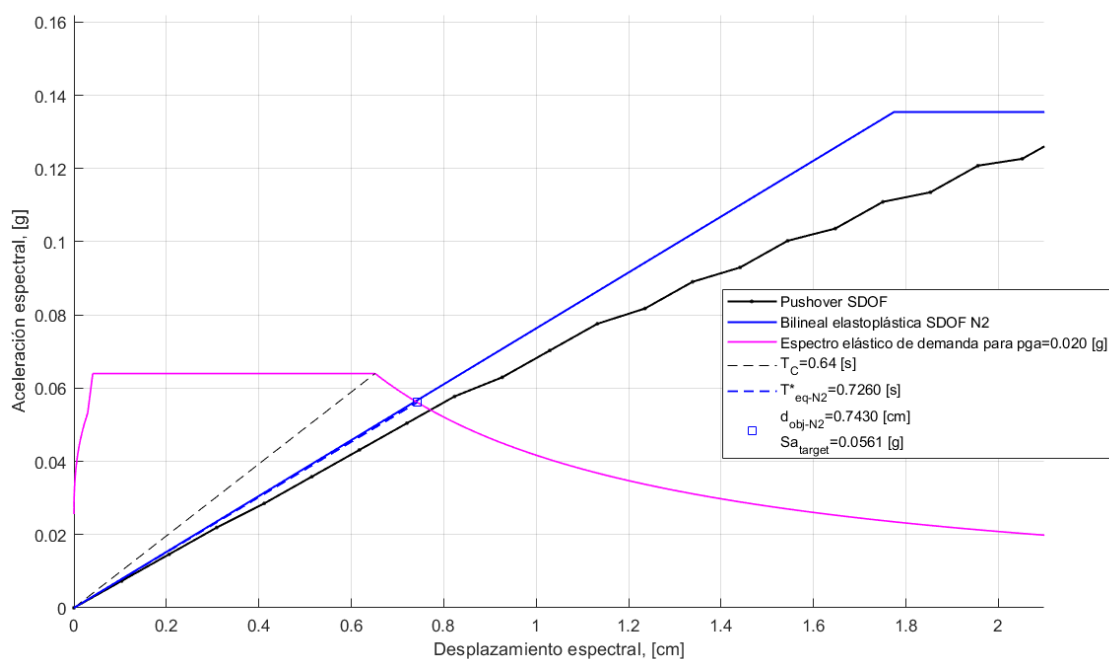


Figura 68. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit Y negatiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Sentit Y positiu

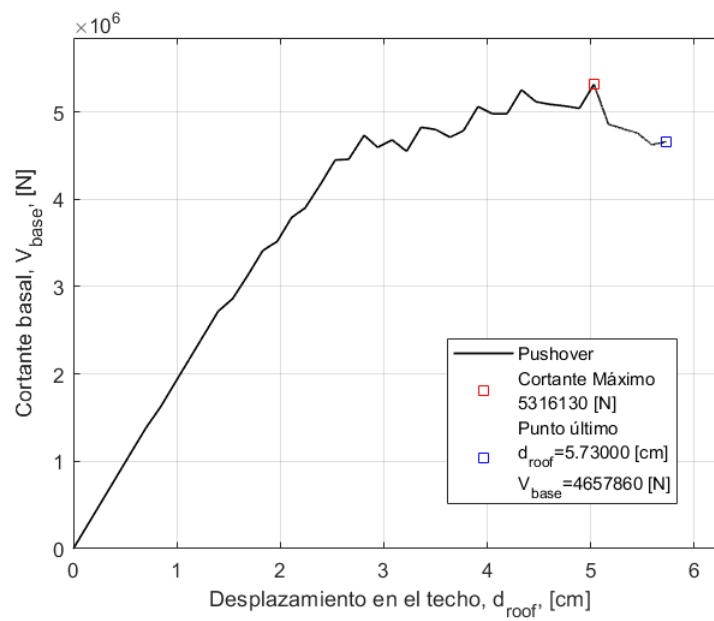


Figura 69. Corba de capacitat sistema MDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01.

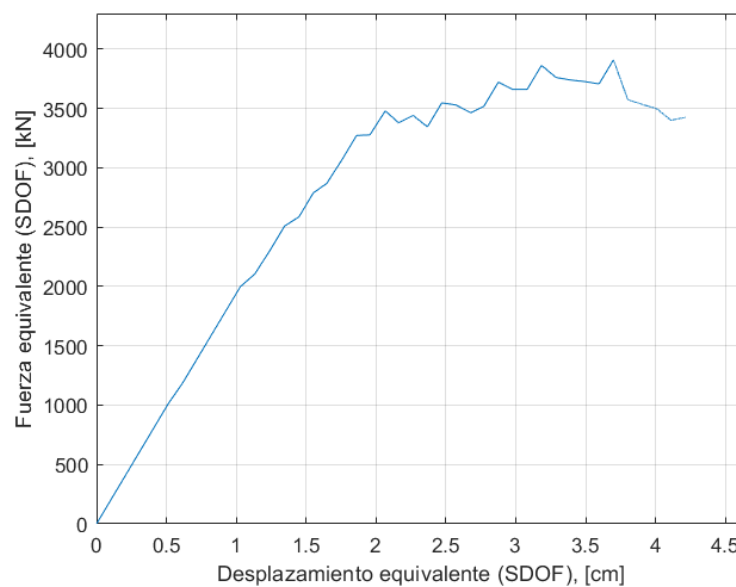


Figura 70. Corba de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01.

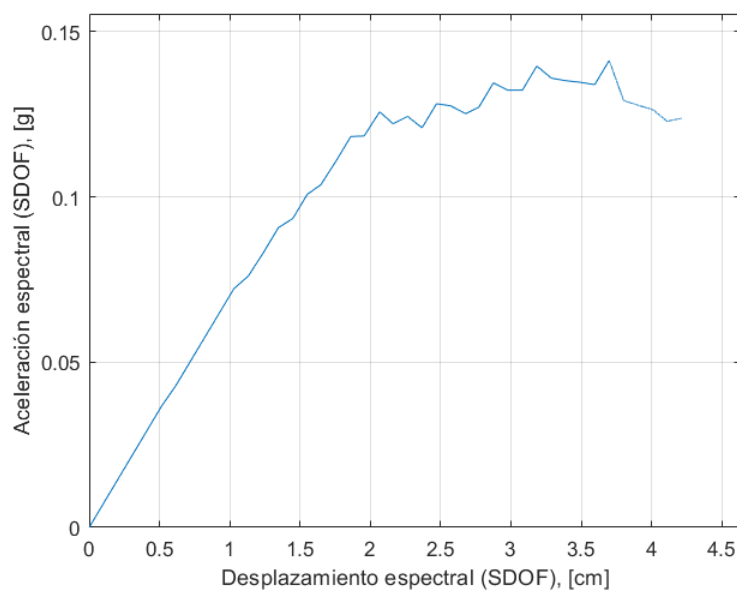


Figura 71. Espectre de capacitat sistema SDOF en sentit Y positiu pel model agregat, AG01.

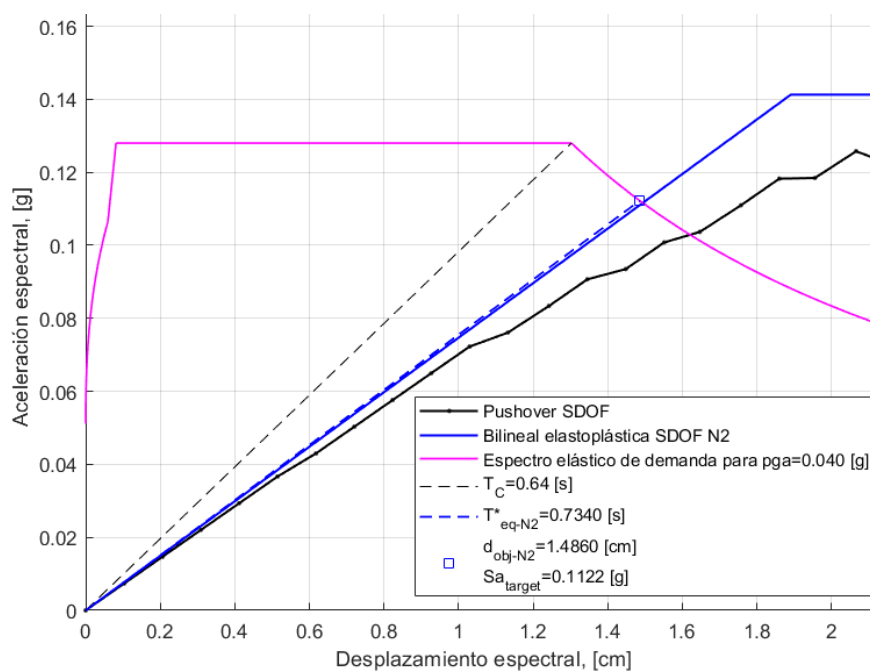


Figura 72. Superposició espectre demanda i espectre de capacitat pel model agregat, AG01 en sentit Y positiu. En el punt de tall, marcat amb un quadre blau, es troba el PP. A la llegenda es poden observar els valors de desplaçament i acceleració espectrals objectiu.

Corbes de fragilitat

Sentit X negatiu

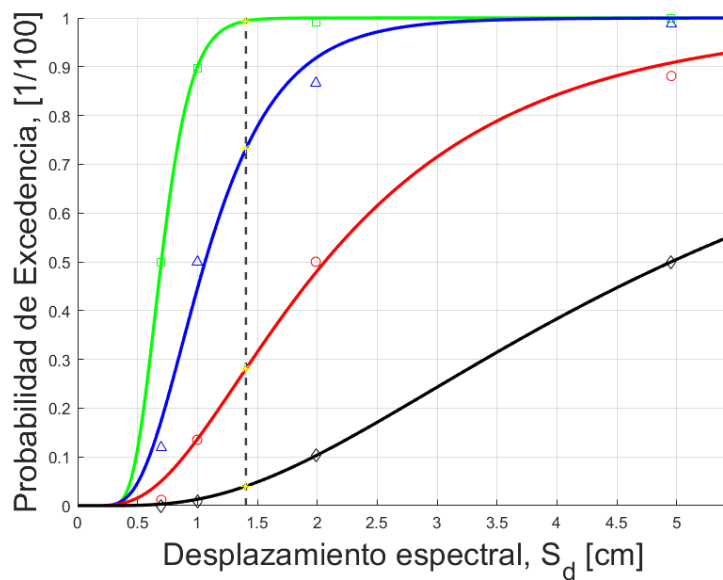


Figura 73. Corba de fragilitat pel model agregat direcció X sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit X positiu

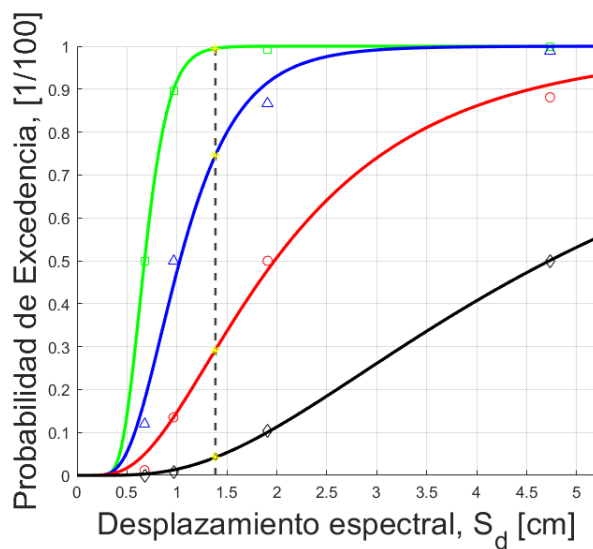


Figura 74. Corba de fragilitat pel model agregat direcció X sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit Y negatiu

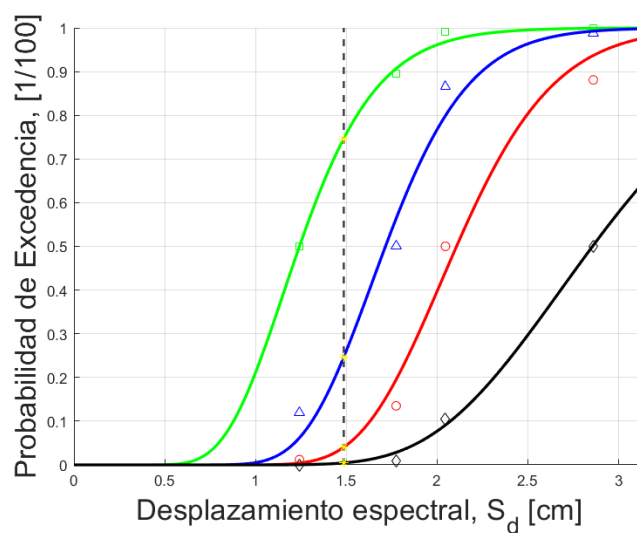


Figura 75. Corba de fragilitat pel model agregat direcció Y sentit negatiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Sentit Y positiu

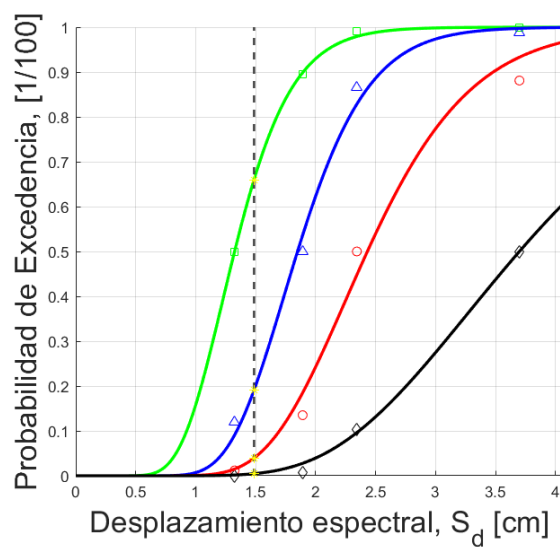


Figura 76. Corba de fragilitat pel model agregat direcció Y sentit positiu. la línia discontinua marca el PP per $p_{ga}=0,04g$.

Probabilitat estats de dany

Sentit X negatiu

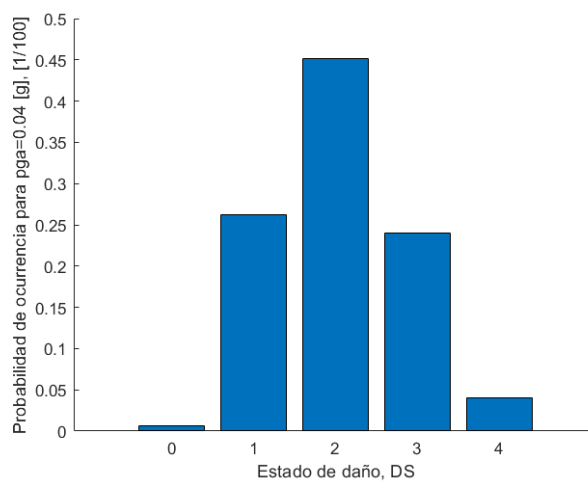


Figura 77. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció X negativa.

Sentit X positiu

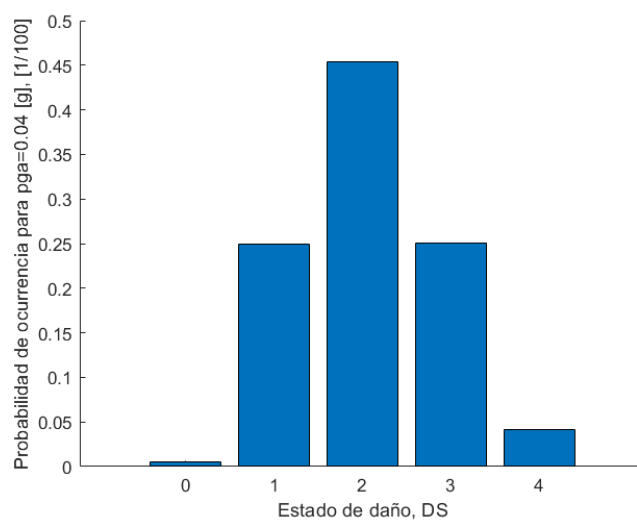


Figura 78. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció X positiva.

Sentit Y negatiu

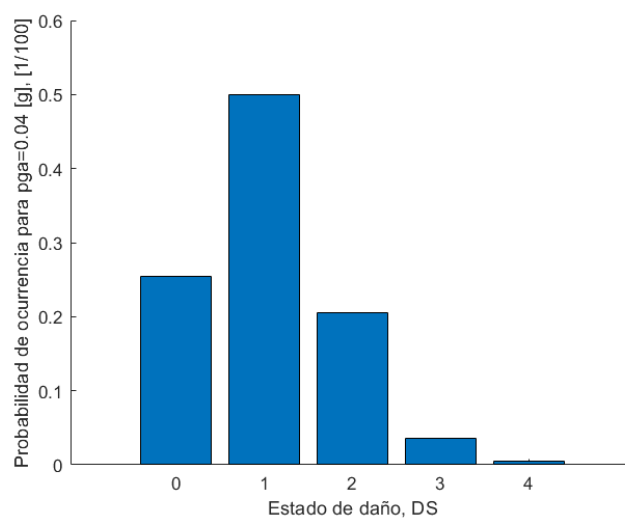


Figura 79. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció Y negativa.

Sentit Y positiu

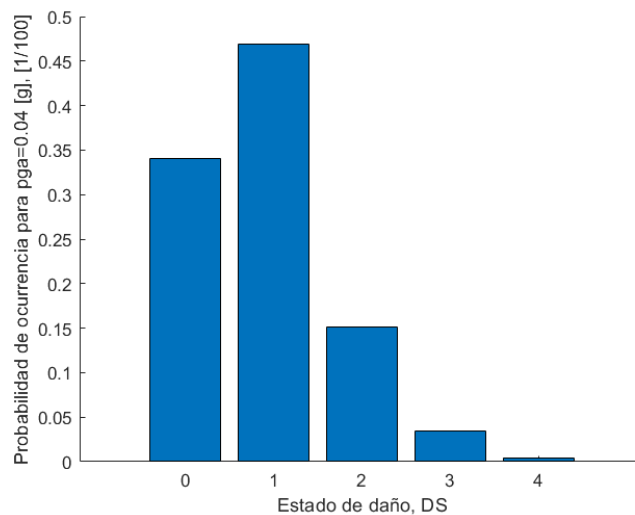


Figura 80. Probabilitat de succeïment de cada estat de dany en tant per un pel model agregat direcció Y positiva.

Índex de dany per desplaçament espectral

Sentit X negatiu

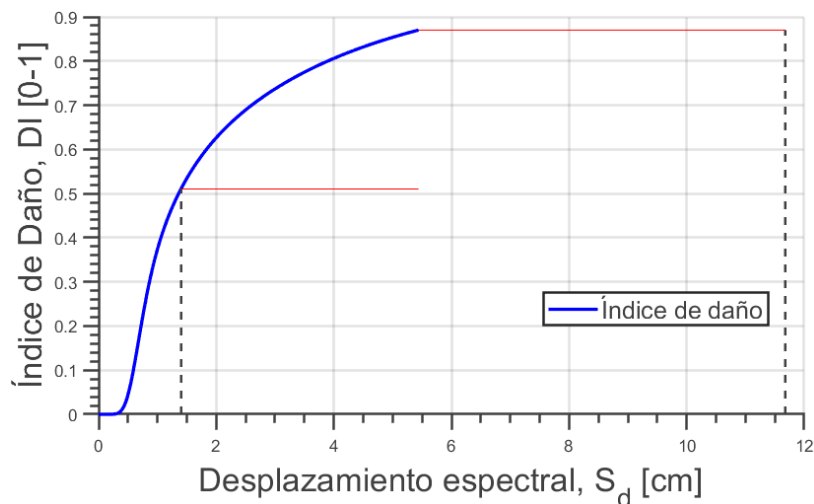


Figura 81. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $pga=0,04$ i $pga=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció X negativa.

Sentit X positiu

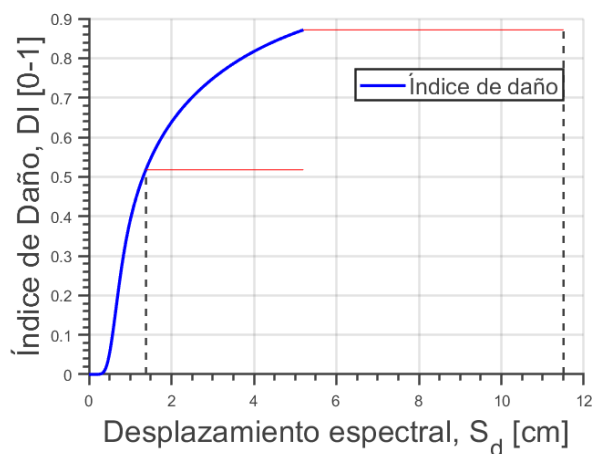


Figura 82. Gràfica de l'índex de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $pga=0,04$ i $pga=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció X positiva.

Sentit Y negatiu

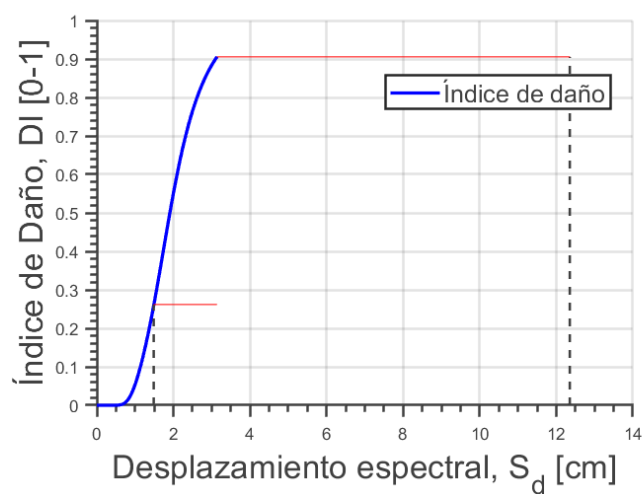


Figura 83. Gràfica de l'índice de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció Y negativa.

Sentit Y positiu

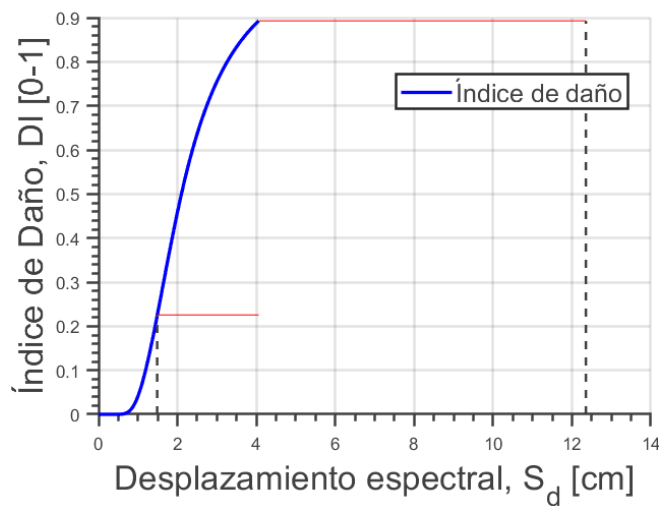


Figura 84. Gràfica de l'índice de dany en tant per u respecte el desplaçament espectral. Marcats amb línia discontinua es mostren els $p_{ga}=0,04$ i $p_{ga}=0,194$. Les dades pertanyen al model agregat AG01 i a la direcció Y positiva.

